Composites Research

Vol. 39, No. 5, 621-628 (2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2026.39.5.621
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

블록 공중합체 기반 메조다공성 탄소의 합성 및 구조 제어 전략

최서연* · 김건우*†

Synthesis and Structural Control Strategies of Block Copolymer-Based Mesoporous Carbons

Seo-yeon Choi*, Keon-Woo Kim*†

ABSTRACT: The increasing demand for energy and high-performance energy storage devices has driven extensive research on electrode materials with high specific surface areas and structural stability. Mesoporous carbons have attracted attention as energy storage materials owing to their high specific surface areas and excellent thermal and chemical stability. Their mesoporous structures can increase the accessible interfacial area between the electrode and electrolyte and facilitate ion transport. This review examines recent research trends in the synthesis and structural control of mesoporous carbons. In particular, the co-assembly of carbon precursors and structure-directing agents through evaporation-induced self-assembly is discussed, along with mesostructure formation and control of pore size and structural stability using PEO-b-PPO-b-PEO, silicate, and high-molecular-weight PS-b-PEO. Methods for preparing mesoporous graphitic carbons using block copolymers as carbon precursors and structure-forming components are also reviewed, focusing on selective swelling, graphitization, heteroatom doping, and direct integration with three-dimensional current collectors. These studies demonstrate that the properties of mesoporous carbons are influenced not only by pore structure but also by the stability of the carbon framework and surface and electrical properties. Therefore, developing synthetic strategies for the precise control of these structural and functional properties will be important for further advancement of mesoporous carbons.

초 록: 현대 사회의 에너지 수요 증가와 에너지 저장 장치의 고성능화 요구에 따라 높은 비표면적과 우수한 구조적 안정성을 갖는 전극 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 메조다공성 탄소는 높은 비표면적, 경량성 및 우수한 열적·화학적 안정성을 가지며, 메조기공을 통해 활물질과 전해질 사이의 계면 접촉 및 이온 전달을 향상시킬 수 있어 에너지 저장 소재로 주목받고 있다. 본 총설에서는 메조다공성 탄소의 합성 및 구조 제어 방법을 중심으로 최근 연구 동향을 고찰하였다. 특히 증발 유도 자기조립을 이용한 탄소 전구체와 구조유도제의 공동조립 원리를 살펴보고, PEO-b-PPO-b-PEO, 규산염 및 고분자량 PS-b-PEO를 이용한 메조구조 형성과 기공 크기 및 구조 안정성 제어 사례를 분석하였다. 또한 BCP의 각 블록을 탄소 전구체 또는 구조 형성 요소로 활용하여 메조다공성 흑연질 탄소를 제조하는 방법과 선택적 팽윤, 흑연화, 이종원소 도핑 및 3차원 집전체와의 직접 결합을 통한 기능 조절 전략을 살펴보았다. 이를 통해 메조다공성 탄소의 특성은 기공 구조뿐만 아니라 탄소 골격의 안정성과 표면 및 전기적 특성에 의해 영향을 받을 수 있음을 확인하였다. 향후에는 이러한 구조적·기능적 특성을 동시에 정밀하게 제어할 수 있는 합성 전략의 개발이 중요할 것으로 판단된다.

Key Words: 메조다공성 탄소(Mesoporous carbon), 소프트 템플레이팅(Soft templating), 블록 공중합체(Block copolymer), 구조 제어(Structural control), 에너지 저장(Energy storage)

Received 4 September 2026, received in revised form 24 October 2026, accepted 28 October 2026

*School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Republic of Korea
†Corresponding author (E-mail: kwkim93@yu.ac.kr)

1. 서 론

현대 사회의 에너지 수요는 점점 증가하고 있다. 이에 대응하기 위해서는 안정적이고 효율적인 에너지 저장 시스템이 개발되어야 한다[1-4]. 에너지 저장 장치의 전기화학적 성능은 전극 소재와 전해질 사이의 계면에서 일어나는 전하 및 이온 전달 과정과 밀접한 관련이 있다. 따라서 활물질과 전해질 사이의 접촉 계면을 증가시키는 것은 에너지 저장 장치의 성능을 향상시키기 위한 효과적인 전략으로서 선택되어 왔다[3]. 이러한 전략은 활물질의 물리적 구조를 제어하기 위한 다양한 연구의 진행으로 연결된다.

접촉 계면을 증가시키는 관점에서 다공성 구조는 내부에 많은 기공을 가지고 있어 여러 장점을 가진다. 첫째, 다공성 구조는 높은 비표면적을 가져 활물질과 전해질 사이의 접촉 가능한 면적이 많다. 둘째, 다공성 구조는 전해질 이온이 전극 내부의 활성 표면에 접근할 수 있는 경로를 제공하여 이온 전달을 촉진할 수 있다[5]. 또한 다공성 구조는 기공 구조의 유형에 따라 서로 다른 특성을 보인다. 따라서 에너지 저장 성능의 향상을 위해서는 위의 두 가지 장점을 동시에 확보할 수 있는 적절한 기공 구조의 설계가 중요하다.

일반적인 다공성 구조는 기공의 크기에 따라 마이크로기공(micropore, <2 nm), 메조기공(mesopore, 2–50 nm), 마크로기공(macropore, >50 nm)으로 구분할 수 있다[6–8]. 마이크로기공은 높은 비표면적을 제공할 수 있는 반면, 메조기공은 비교적 큰 기공 크기를 통해 물질 전달에 유리하면서도 높은 비표면적을 확보할 수 있다는 장점이 있다[9–12]. 반대로 마크로 기공은 물질 전달 (이온 전달) 부분에선 유리하지만 동일한 부피에서 확보할 수 있는 비표면적에 한계가 있다[13–15]. 이에 비해 메조기공을 가지는 메조다공성 구조는 비교적 큰 기공과 높은 비표면적을 동시에 확보할 수 있어 표면적과 물질 전달 특성을 균형 있게 제공할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 메조다공성 구조는 촉매, 에너지 저장 및 센서 등 다양한 분야에서 선택되어 왔다[16-18].

탄소 소재는 경량성, 우수한 열적·화학적 안정성을 가지며, 다공성 구조를 통해 높은 비표면적을 확보할 수 있다. 이러한 특성 때문에 탄소는 에너지 저장 장치의 활물질로서 주목받고 있다[19]. 만약 탄소의 장점을 살리며 메조다공성 구조를 확보할 수 있다면 다양한 에너지 저장 시스템에서 활용될 수 있다. 따라서 메조다공성 탄소의 구조와 기공의 특성을 정밀하게 제어하기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[20,21]. 메조다공성 탄소의 특성은 합성 과정에서 만들어지는 기공의 크기와 구조뿐만 아니라 탄소 전구체와 구조유도제(structure-directing agent, SDA) 선택 및 열처리 조건 등에 의해 크게 영향을 받을 수 있다[23-26]. 특히 소프트 템플레이팅(Soft templating) 방식을 이용해 메조다공성 탄소를 제작하기 위해서는 탄소 전구체와 SDA의 공동조립 (co-assembly)을 통해서 메조다공성 구조 복합체를 생성해야 한다[24-31]. 이후 고온 열처리를 통해 탄소 전구체가 탄소 골격으로 전환되고 SDA가 제거된다[24-26]. 이때 메조다공성 구조의 탄소 골격을 유지해야 하기 때문에 적절한 탄소 전구체와 SDA의 선택이 중요하다[23-26].

소프트 템플레이팅은 블록 공중합체 (block copolymer, BCP)와 같은 SDA의 자기조립을 이용하여 생성할 메조다공성 소재의 조성과 형태, 기공 구조를 다양하게 조절할 수 있다는 장점을 가진다[1,3,23,24]. 특히 BCP는 친수성 및 소수성 블록의 길이를 조절함으로써 기공의 크기와 벽 두께를 제어할 수 있어 메조다공성 구조를 세심하게 설계하는 것에 유리하다[1,3,23,24]. 따라서 본 논문에서는 메조다공성 탄소의 구조적 특성과 합성 전략에 초점을 맞추고, 특히 BCP 기반 소프트 템플릿 방법을 중심으로 메조다공성 탄소의 형성 원리와 구조 제어 방법을 고찰하고자 한다. 또한 다양한 탄소 전구체와 SDA를 이용한 메조다공성 탄소의 합성 사례를 알아보고, 기공 구조 및 탄소 골격의 안정성의 향상을 위한 주요 전략과 최근의 발전 방향을 논의하고자 한다.

2. 이론 전개

2.1 메조다공성 탄소의 합성 원리

메조다공성 탄소의 합성에는 하드 템플레이팅(hard templating)과 소프트 템플레이팅(soft templating) 등의 방법이 사용되어 왔다[11,27-31,37,38]. 이 중 소프트 템플레이팅 방법은 SDA의 자기조립을 이용하여 메조구조를 형성한 후, 열처리 등을 통해 SDA를 제거하여 메조다공성 구조를 형성하는 방법이다[27-31]. 소프트 템플레이팅에서 메조구조의 형성은 증발 유도 자기조립(evaporation-induced self-assembly, EISA)에 의해 이루어질 수 있다. EISA 과정에서는 용매가 증발함에 따라 SDA와 탄소 전구체의 농도가 증가하고, 임계 농도에 도달하면 SDA의 자기조립과 미셀 형성이 유도된다. 이후 탄소 전구체와 SDA의 상호작용 및 공동조립을 통해 메조구조 복합체가 형성된다[27-31]. 또한 소프트 템플레이팅 방법은 전구체와 SDA의 분자 구조를 조절함으로써 다양한 조성과 형태를 가진 메조다공성 소재를 생산할 수 있다[27-31].

이후 고온 열처리 과정에서 탄소 전구체는 탄소 골격으로 전환되고 SDA는 열분해되어 제거됨으로써 메조기공이 형성된다[24–26]. 따라서 탄소 전구체는 열처리 과정에서 구조를 유지할 수 있는 충분한 열적 안정성을 가져야 하며, SDA 역시 적절한 온도에서 제거될 수 있어야 한다[24–26]. 이러한 이유로 탄소 전구체와 SDA의 종류 및 조성은 최종적으로 형성되는 메조다공성 탄소의 구조적 특성을 결정하는 중요한 요소이다[24–26].

SDA로는 저분자 계면활성제와 블록 공중합체(block copolymer, BCP)가 사용될 수 있다. 이러한 SDA의 자기조

립은 메조다공성 실리카 및 유무기 복합체 연구에서도 활용되어 왔다[22,32–36]. 계면활성제는 저렴하고 용해성이 우수하여 메조다공성 소재를 비교적 쉽게 제조할 수 있다는 장점이 있지만, 낮은 분자량으로 인해 기공 크기 조절에 한계가 있다[1,3]. 반면 BCP는 친수성 블록과 소수성 블록의 길이를 조절할 수 있어 기공 크기와 벽 두께를 정밀하게 제어할 수 있다[23,24]. 또한 BCP의 종류와 분자량을 조절함으로써 다양한 메조구조를 구현할 수 있다는 장점이 있다[1,3].

2.2 BCP 기반 메조다공성 탄소의 합성 및 구조 제어

멍옌 교수 연구 그룹에서는 Pluronic 계열의 SDA인 poly(ethylene oxide)-b-poly(propylene oxide)-b-poly(ethylene oxide) (PEO-b-PPO-b-PEO)를 SDA로 사용하고 phenol과 formaldehyde로 구성된 저분자량 고분자를 탄소 전구체로 이용하여 소프트 템플레이팅에 의한 메조다공성 탄소의 합성을 처음으로 보고하였다[25]. 100–140 °C에서 열중합을 통해 열적으로 안정한 resol resin을 형성하였다. 이후 열처리를 통해 SDA가 제거되고 resol resin이 탄소 골격으로 전환되었다. FDU-16의 350 °C 열처리 시료는 약 6.8 nm의 기공 직경, 590 $m^2\ g^{-1}$의 비표면적 및 0.51 $cm^3\ g^{-1}$의 기공 부피를 나타냈으며, 800 °C 탄화 시료의 값은 각각 3.8 nm, 760 $m^2\ g^{-1}$ 및 0.44 $cm^3\ g^{-1}$이었다[25].

그러나 이 과정에서 탄화에 따른 구조 수축이 발생하여 기공 크기와 기공 부피가 감소하는 문제가 나타났다. 이를 해결하기 위해 류 루이리 교수 연구 그룹은 규산염 올리고머, PEO-b-PPO-b-PEO 및 resol을 이용한 세 성분 공동조립(triconstituent co-assembly) 방법을 제안하였다. [26] 이 방법에서는 규산염이 보강재로 작용하여 탄화 과정에서 발생하는 구조 수축을 완화하였다. 900 °C에서 탄화한 후 실리카(silica)를 제거함으로써 5.8 nm의 기공 크기, 2.02 $cm^3\ g^{-1}$의 기공 부피 및 2470 $m^2\ g^{-1}$의 높은 비표면적을 갖는 정렬된 메조다공성 탄소(MP-C-36)를 제조할 수 있었다[26].

한편, 기존 Pluronic 계열 SDA는 낮은 분자량으로 인해 제조되는 메조다공성 탄소의 기공 크기가 10 nm 이하로 제한되는 문제가 있었다. 이를 개선하기 위해 덩 융후이 교수 연구 그룹은 F127(12,600 g mol^{-1})보다 높은 분자량(29,700 g mol^{-1})의 PS_{230}-b-PEO_{125}를 SDA로 사용하여 800 °C의 질소 분위기에서 평균 22.6 nm의 기공을 갖는 메조다공성 탄소(C-FDU-18-800)를 제조하였다(Fig. 1)[24]. 이 결과는 BCP의 분자량 조절이 메조다공성 탄소의 기공 크기를 제어하는 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

BCP의 분자 구조와 최종 메조기공 구조의 관계는 블록의 부피분율과 블록 간 상호작용에 따른 자기조립 형태를 통해 설명할 수 있다[1]. 각 블록의 부피분율에 따라 구형, 원통형, 이연속성 자이로이드 및 라멜라 등의 구조가 형성되며, 이는 최종 기공의 형태와 연결성에 영향을 미친다[1].

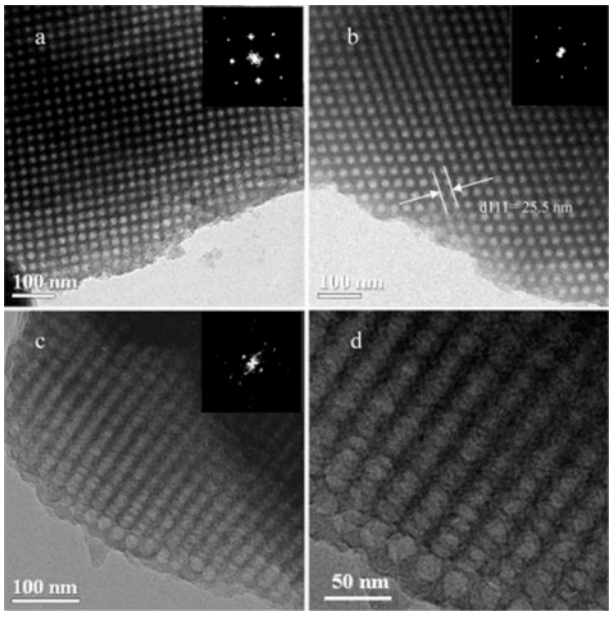


Fig. 1. TEM images of mesoporous carbon C-FDU-18-800 prepared using PS_{230}-b-PEO_{125} and pyrolyzed at 800 °C in N_2 viewed from the [100] (a), [110] (b), and [211] (c, d) directions. The reported mean mesopore size is 22.6 nm. The image in panel (d) is the enlarged image of that in panel (c). Insets are corresponding FFT diffractograms [24] Copyright 2007, American Chemical Society

또한 Flory–Huggins 상호작용 매개변수(χ)와 전체 중합도(N)의 곱인 χN은 블록 간 비상용성에 따른 미세상 분리의 정도를 나타내는 주요 지표이다[1]. 따라서 최종 메조구조를 제어하기 위해서는 BCP의 분자량뿐만 아니라 블록의 부피분율과 상호작용에 따른 자기조립 형태를 함께 고려해야 한다. 기공 벽 두께는 탄소 전구체의 함량과 탄소 형성 영역의 부피뿐 아니라 탄화 중 질량 손실과 수축에도 영향을 받는다[24–26]. 아울러 탄화 과정에서 발생하는 구조 변화로 인해 초기 자기조립 구조와 최종 탄소 구조가 달라질 수 있으므로, 탄화 후 구조의 안정성도 중요하다[23,42].

2.3 BCP 자체를 이용한 메조다공성 탄소 합성

기존의 소프트 템플레이팅에서는 탄소 전구체와 SDA를 별도로 사용하여 메조구조를 형성하지만, 최근에는 BCP 자체를 탄소원과 SDA로 동시에 활용하는 방법이 제안되고 있다. 해당 방법은 BCP의 블록별 선택적 상호작용 또는 탄화·제거 거동을 이용하여 메조구조를 형성하고, 이를 탄소 골격 및 메조기공 형성으로 연결함으로써 메조다공성 탄소를 제조한다. 이러한 전략은 별도의 탄소 전구체와 SDA를 조합하는 공정을 줄이고, 블록 조성을 통해 기공 구조를 제어할 수 있다는 장점이 있다[23,42]. 반면, 탄화 중 질량 손실은 탄소 수율을 제한하고, 구조 수축이나 붕괴로 인해 초기 자기조립 구조가 그대로 유지되지 않을 수 있다[23,42].

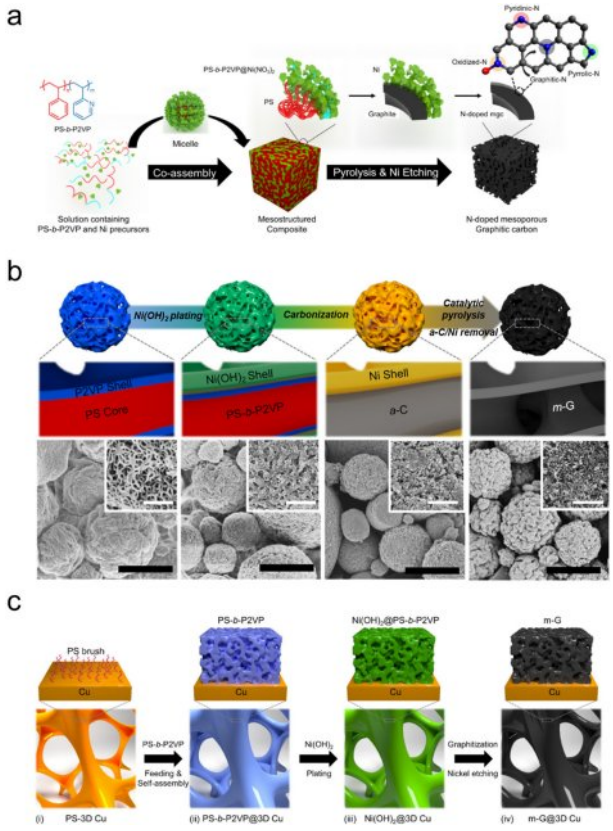


Fig. 2. Schematic illustrations of block copolymer-based synthesis strategies for mesoporous carbon materials: (a) synthesis of N-doped mesoporous graphitic carbon using PS-b-P2VP as a template and carbon/nitrogen precursor, followed by co-assembly, pyrolysis, and Ni etching; [39] Copyright 2023, American Chemical Society. (b) fabrication of mesoporous graphene through selective swelling of PS-b-P2VP, Ni-based catalyst introduction, carbonization, catalytic graphitization, and Ni removal; [41] Copyright 2022, American Chemical Society. (c) fabrication of mesoporous graphitic carbon on a three-dimensional Cu current collector (m-G@3D Cu) via PS-b-P2VP feeding and self-assembly, selective swelling, $Ni(OH)_2$ plating, graphitization, and Ni etching. [40] Copyright 2025, Royal Society of Chemistry

또한 고분자 전구체의 제조 비용, 용매 사용 및 열처리의 균일성은 대량생산을 위해 검토해야 할 요소이며, PS-b-P2VP 기반 방법에서는 촉매 도입과 제거 공정도 필요하다[39–41].

김진곤 교수 연구 그룹에서는 polystyrene-b-poly(2-vinylpyridine) (PS-b-P2VP)를 이용하여 질소 도핑 메조다공성 흑연질 탄소(nitrogen-doped mesoporous graphitic carbon, N-MGC)을 제조하였다(Fig. 2(a))[39]. PS-b-P2VP, 질산니켈 및 citric acid를 테트라하이드로퓨란과 에탄올의 혼합 용매에 용해한 후 용매를 증발시키면서 PS-b-P2VP와 질산니켈의 공동조립을 유도하였다. 이 과정에서 질산니켈은 P2VP의 pyridine 작용기와 선택적으로 상호작용하여 메조구조 복합체 형성에 기여하였다[39].

형성된 메조구조 복합체를 700–900 °C에서 열처리하면 PS-b-P2VP가 탄소 골격으로 전환되며, Ni는 흑연화를 촉진하는 촉매로 작용한다[39]. 또한 P2VP에 존재하는 pyridine의 질소가 탄소 골격에 도입되어 질소 도핑된 흑연질 탄소가 형성된다[39]. 이후 산 처리를 통해 Ni를 제거하여 최종적인 질소 도핑된 메조다공성 흑연질 탄소를 제조하였다[39]. 900 °C에서 제조된 시료는 약 351 $m^2\ g^{-1}$의 비표면적과 18 nm의 기공 크기를 나타냈으며, 메조기공이 서로 연결된 구조를 형성하였다[39].

한편, PS-b-P2VP를 이용한 메조다공성 흑연질 탄소의 제조에는 용매 증발에 따른 공동조립과 다른 메조구조 형성 방법도 적용되었다. 김진곤 교수 연구그룹은 PS-b-P2VP의 선택적 팽윤(selective swelling)을 이용하여 메조구조를 형성하였다[41]. PS-b-P2VP를 가열된 에탄올로 처리하면 에탄올이 P2VP 블록을 선택적으로 팽윤시키며, 이후 에탄올을 제거하는 과정에서 P2VP 영역이 수축하면서 메조구조가 형성된다(Fig. 2(b))[41].

이후 형성된 메조다공성 PS-b-P2VP에 Ni 기반 촉매를 도입하고 고온 열처리를 수행하여 PS-b-P2VP를 흑연질 탄소로 전환하였다[41]. Ni는 이 과정에서 흑연화를 촉진하며, 최종적으로 Ni를 제거하여 메조다공성 그래핀(m-G)을 제조하였다[41]. 제조된 m-G는 약 3.5 nm의 기공 크기와 186 $m^2\ g^{-1}$의 비표면적을 나타냈다[41]. 이 연구는 BCP의 자기조립을 이용하여 메조구조를 먼저 형성한 후 흑연화를 수행함으로써 메조다공성 그래핀을 제조할 수 있음을 보여준다.

이러한 PS-b-P2VP 기반 합성 전략은 3차원 집전체를 이용한 전극 제조에도 적용되었다. 김진곤 교수 연구그룹은 PS-b-P2VP를 3차원(3D) Cu에 직접 도입하여 메조다공성 흑연질 탄소 (m-G)을 형성하였다[40]. 먼저 3D Cu 표면에 PS-b-P2VP를 도입한 후 가열된 에탄올을 이용하여 P2VP 블록을 선택적으로 팽윤시키고 에탄올을 제거하여 메조구조를 형성하였다[40]. 이후 메조다공성 PS-b-P2VP에 $Ni(OH)_2$를 무전해 도금하고 고온 열처리를 수행하여 흑연질 탄소로 전환하였다(Fig. 2(c))[40].

열처리 과정에서 $Ni(OH)_2$로부터 형성된 Ni가 PS-b-P2VP의 흑연화를 촉진하며, 이후 Ni를 제거하여 3D Cu 위에 직접 형성된 메조다공성 흑연질 탄소를 얻었다[40]. 이 방법은 별도의 바인더를 사용하지 않고 탄소 소재를 3차원 집전체에 직접 형성할 수 있다는 장점이 있으며, PS-b-P2VP의 투입량을 증가시켜 최대 32 mg cm^{-2}의 높은 면적당 질량로딩을 구현하였다[40].

PS-b-P2VP 외에도 BCP 자체를 탄소 전구체와 희생 블록으로 활용한 메조다공성 탄소의 제조가 보고되었다. Yan 등은 polyacrylonitrile-b-poly(methyl methacrylate) (PAN-b-PMMA)를 탄소 전구체와 SDA로 동시에 이용하여 메조다

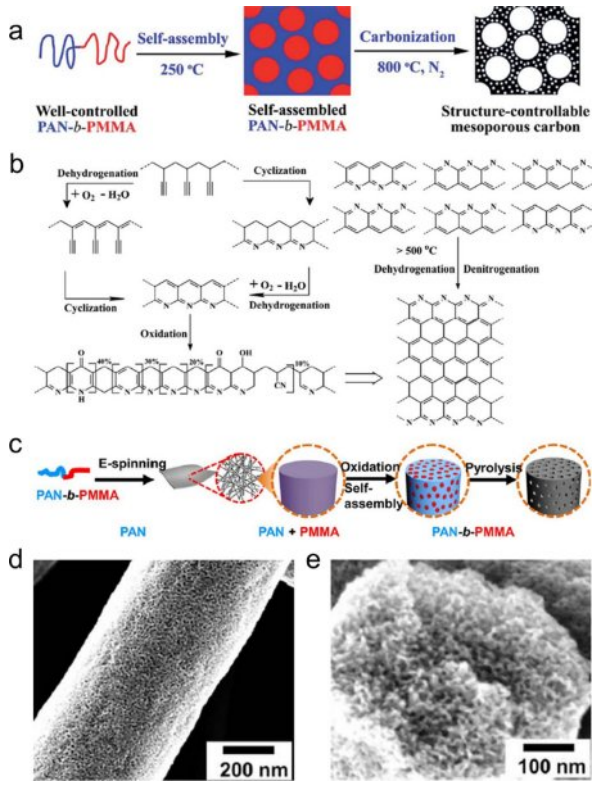


Fig. 3. (a) Conversion process of PAN-b-PMMA into mesoporous carbon. (b) Mechanism of thermal chemistry of PAN carbonization, including (left) thermal stabilization and (right) pyrolysis involving dehydrogenation and denitrogenation, which eventually lead to a partially graphitic structure. Panels (a, b): Ref. [23], copyright 2015, Royal Society of Chemistry. (c) Fabrication of the mesoporous carbon fiber. (d, e) SEM images of the mesoporous carbon fiber. Panels (c–e): Ref. [42], © 2019 The Authors, distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License (CC BY 4.0)

공성 탄소를 제조하였다(Fig. 3(a))[23]. PAN과 PMMA는 각각 탄소원과 희생 블록으로 작용하며, PAN-b-PMMA는 미세상분리를 통해 250 °C에서 메조구조를 형성하였다[23]. 이후 800 °C에서 탄화하는 과정에서 PAN은 탄소로 전환되고 PMMA는 열분해되어 메조기공을 형성하였다[23]. 이 과정에서 PAN의 가교 반응은 열적 안정성을 향상시켜 탄화 과정에서 구조 붕괴를 억제하였다(Fig. 3(b))[23]. 또한 희생 블록인 PMMA의 분자량 또는 부피분율을 조절함으로써 최종 메조다공성 탄소의 기공 크기를 제어할 수 있었다[23].

이러한 접근법은 별도의 탄소 전구체와 SDA를 조합하는 과정에서 발생하는 일부 공정 변수를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 저우 정핑 교수 연구 그룹은 64 vol% PAN을 포함하는 PAN-b-PMMA를 전기방사하여 메조다공성 탄소 섬유 합성을 입증했다(Fig. 3(c))[42]. 전기방사 과정에서 용매가 빠르게 증발하여 섬유가 형성되었다[42]. 이후 산화 공정은 PAN의 가교 및 고리화를 통해 섬유 구조를 안정화했다[42]. 열분해 후, 섬유는 응집 없이 형태를 유지했으며 이연속성(bicontinuous) 메조다공성 구조를 나타냈다(Fig. 3(d, e))[42].

이상의 연구들은 BCP의 자기조립 특성을 활용하여 메조구조를 형성하고, 이를 다양한 기능과 구조로 확장할 수 있음을 보여준다. 특히 PS-b-P2VP를 이용한 연구에서는 EISA와 선택적 팽윤 등 서로 다른 메조구조 형성 방법을 통해 메조다공성 흑연질 탄소를 제조하였으며, 질소 도핑 및 3차원 집전체와의 직접 결합을 통해 기능성을 확장하였다.

대표적인 합성 조건과 기공 특성을 Table 1에 정리하였다. PS-b-P2VP 기반 N-MGC와 m-G의 비표면적(각각 351 및 186 $m^2\ g^{-1}$)은 Pluronic 기반 시료보다 낮지만, 흑연화된 골격은 전자 전달에 유리할 수 있다[25,26,39,41]. 따라서 비표면적뿐 아니라 전해질이 접근할 수 있는 기공 구조와 전

Table 1. Representative synthesis conditions and pore characteristics of BCP-derived mesoporous carbons

BCP / representative sample [Ref.]	Carbon precursor	Mesostructure formation / strategy	Final heat treatment (°C)	Pore size (nm)	BET area ($m^2\ g^{-1}$)
Pluronic F127 / FDU-16 [25]	Resol	EISA; separate SDA	800	3.8	760
Pluronic F127 / MP-C-36 [26]	Resol	EISA with silicate reinforcement; silica removal	900	5.8	2470
PS-b-P2VP / N-MGC [39]	BCP	Ni coordination / co-assembly; catalytic graphitization	900	18	351
PS-b-P2VP / m-G [41]	BCP	Selective swelling; Ni-catalyzed graphitization	1000[a]	3.5	186
PS-b-P2VP / m-G@3D Cu [40]	BCP	Selective swelling on Cu; Ni-catalyzed graphitization	700	3 and 20[b]	182[g]
PAN-b-PMMA / bulk carbons [23]	PAN block	Microphase separation; PMMA removal	800[c]	5.96–17.42[d]	213.1–427.6[d]
PAN-b-PMMA / carbon fibers [42]	PAN block	Electrospinning / microphase separation; PMMA removal	800[e]	9.3[f]	503

Values are representative reported results, not a ranking under identical conditions. [a] Initial treatment at 350 °C followed by graphitization at 1000 °C. [b] Bimodal pore distribution. [c] Assembly/stabilization at 250 °C before carbonization. [d] Ranges across different block compositions, not paired values for a single sample. [e] Oxidative stabilization at 280 °C before carbonization. [f] Representative mesopore size from N_2 adsorption (NLDFT). [g] Measured on carbon separated from the Cu collector of the 32 mg cm^{-2} electrode.

자·이온 전달을 함께 고려해야 한다. 다만 서로 다른 합성 조건의 결과이므로 비표면적 차이만으로 흑연화와의 보편적인 반비례 관계를 판단할 수는 없다.

3. 결 론

본 총설에서는 에너지 저장 시스템의 활물질로 활용되는 메조다공성 탄소의 구조적 특징과 합성 전략을 중심으로 주요 연구 동향을 고찰하였다. 메조다공성 탄소는 높은 비표면적과 메조기공 구조를 통해 활물질과 전해질 사이의 계면 접촉 면적 및 이온 전달 특성을 향상시킬 수 있으며, 탄소 소재의 경량성과 우수한 열적·화학적 안정성을 동시에 활용할 수 있다는 점에서 에너지 저장 소재로서 중요한 의미를 가진다.

소프트 템플레이팅은 SDA의 자기조립과 탄소 전구체의 공동조립을 통해 메조구조를 형성할 수 있으며, EISA와 같은 자기조립 과정을 이용하여 다양한 메조구조를 구현할 수 있다. 특히 BCP는 분자량과 블록 조성에 따라 기공 크기와 벽 두께를 조절할 수 있어 메조다공성 탄소의 구조를 제어하는 데 유용하다. 그러나 탄화 과정에서 발생하는 구조 수축과 고온 열처리에 따른 메조구조의 붕괴는 여전히 해결해야 할 주요 문제이다. 이를 개선하기 위해 규산염을 이용한 구조 보강과 고분자량 BCP를 이용한 기공 크기 제어 등의 전략이 제안되었다.

또한 최근에는 BCP를 단순한 SDA로 사용하는 것을 넘어, BCP 자체를 탄소 전구체와 구조 형성 요소로 활용하는 합성 전략이 제안되고 있다. PS-b-P2VP를 이용한 연구에서는 EISA 및 선택적 팽윤을 통해 메조구조를 형성한 후 Ni를 이용한 흑연화를 통해 메조다공성 흑연질 탄소를 제조하였으며, P2VP의 질소를 이용한 질소 도핑을 통해 탄소 골격의 화학적 특성을 조절할 수 있었다. 이러한 합성 전략은 3차원 Cu 집전체에 메조다공성 흑연질 탄소를 직접 형성하는 방식으로도 확장되어, 무바인더 전극 및 높은 면적당 질량 로딩을 구현하는 데 활용되었다. 또한 PAN-b-PMMA와 같이 BCP의 각 블록을 탄소원과 희생 블록으로 활용하여 메조다공성 탄소를 제조하는 접근법도 보고되었다.

따라서 메조다공성 탄소의 성능 향상을 위해서는 단순히 비표면적을 증가시키는 것뿐만 아니라, 기공 크기와 기공 부피, 벽 두께, 탄소 골격의 구조적 안정성 및 표면 화학적 특성을 종합적으로 고려한 구조 설계가 필요하다. 향후에는 BCP의 자기조립 특성과 탄화 거동을 정밀하게 제어하여 열처리 과정에서의 구조 수축 및 붕괴를 억제하고, 동시에 흑연화와 이종원소 도핑 등을 통해 전기적·화학적 특성을 조절할 수 있는 합성 전략을 개발하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 이러한 접근은 에너지 저장 장치의 요구 조건에 적합한 메조다공성 탄소의 구조 및 특성 설계로 이어질 수 있다.

후 기

본 과제(결과물)은 2026년도 교육부 및 경상북도의 재원으로 경북앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다. (2026-ANCHOR-15-115)

REFERENCES

1. Li, C., Li, Q., Kaneti, Y. V., Hou, D., Yamauchi, Y., Mai, Y., Self-assembly of block copolymers towards mesoporous materials for energy storage and conversion systems. *Chem. Soc. Rev.*, 2020, 49(14), 4681-4736.
2. Lim, E., Jo, C., Lee, J., A mini review of designed mesoporous materials for energy-storage applications: from electric double-layer capacitors to hybrid supercapacitors. *Nanoscale*, 2016, 8(15), 7827-7833.
3. Deng, Y., Wei, J., Sun, Z., Zhao, D., Large-pore ordered mesoporous materials templated from non-Pluronic amphiphilic block copolymers. *Chem. Soc. Rev.*, 2013, 42(9), 4054-4070.
4. Kim, T., Song, W., Son, D., Ono, L. K., Qi, Y., Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(7), 2942-2964.
5. Tan, K. W., Jung, B., Werner, J. G., Rhoades, E. R., Thompson, M. O., Wiesner, U., Transient laser heating induced hierarchical porous structures from block copolymer–directed self-assembly. *Science*, 2015, 349(6243), 54-58.
6. Soboleva, T., Zhao, X., Malek, K., Xie, Z., Navessin, T., Holdcroft, S., On the Micro-, Meso-, and Macroporous Structures of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Catalyst Layers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, 2(2), 375-384.
7. Wang, Y., Zhu, Y., Chen, S., Li, W., Characteristics of the Nanoscale Pore Structure in Northwestern Hunan Shale Gas Reservoirs Using Field Emission Scanning Electron Microscopy, High-Pressure Mercury Intrusion, and Gas Adsorption. *Energy Fuels*, 2014, 28(2), 945-955.
8. Gogotsi, Y., Nikitin, A., Ye, H., Zhou, W., Fischer, J. E., Yi, B., Foley, H. C., Barsoum, M. W., Nanoporous carbide-derived carbon with tunable pore size. *Nature Materials*, 2003, 2(9), 591-594.
9. Jiang, J., Li, Y., Liu, J., Huang, X., Yuan, C., Lou, X. W., Recent Advances in Metal Oxide-based Electrode Architecture Design for Electrochemical Energy Storage. *Adv. Mater.*, 2012, 24(38), 5166-5180.
10. Kotaka, T., Tabuchi, Y., Mukherjee, P. P., Microstructural analysis of mass transport phenomena in gas diffusion media for high current density operation in PEM fuel cells. *J. Power Sources,* 2015, 280, 231-239.
11. Malgras, V., Tang, J., Wang, J., Kim, J., Torad, N. L., Dutta, S., Ariga, K., Hossain, M. S. A., Yamauchi, Y., Wu, K. C. W., Fabrication of Nanoporous Carbon Materials with Hard- and Soft-Templating Approaches: A Review. *J. Nanosci. Nanotechnol.,* 2019, 19(7), 3673-3685.
12. Ren, X., Li, H., Chen, J., Wei, L., Modak, A., Yang, H., Yang, Q., N-doped porous carbons with exceptionally high CO2 selec-

tivity for CO2 capture. *Carbon*, 2017, 114, 473-481.
13. Wu, L., Li, Y., Fu, Z., and Su, B., Hierarchically structured porous materials: synthesis strategies and applications in energy storage *Natl. Sci. Rev.*, 2020, 7, 1667–1701.
14. De France, K. J., Xu, F., Hoare, T., Macroporous Hydrogels: Structured Macroporous Hydrogels: Progress, Challenges, and Opportunities. *Adv. Healthc. Mater.*, 2018, 7(1), 1700927.
15. Ding, Y., Wang, C., Zheng, R., Maitra, S., Zhang, G., Barakat, T., Roy, S., Su, B., Chen, L., Three-dimensionally ordered macroporous materials for photo/electrocatalytic sustainable energy conversion, solar cell and energy storage. *EnergyChem*, 2022, 4(4), 100081.
16. Lee, S., Choun, M., Ye, Y., Lee, J., Mun, Y., Kang, E., Hwang, J., Lee, Y., Shin, C., Moon, S., Kim, S., Lee, E., Lee, J., Designing a Highly Active Metal-Free Oxygen Reduction Catalyst in Membrane Electrode Assemblies for Alkaline Fuel Cells: Effects of Pore Size and Doping-Site Position. *Angew. Chem., Int. Ed*., 2015, 54(32), 9230-9234.
17. Wagner, T., Haffer, S., Weinberger, C., Klaus, D., Tiemann, M., Mesoporous materials as gas sensors. *Chem. Soc. Rev.*, 2013, 42(9), 4036-4053.
18. Shimizu, Y., Jono, A., Hyodo, T., Egashira, M., Preparation of large mesoporous SnO2 powder for gas sensor application. *Sens. Actuators, B,* 2005, 108(1-2), 56-61.
19. Jo, C., Park, Y., Jeong, J., Lee, K. T., Lee, J., Structural Effect on Electrochemical Performance of Ordered Porous Carbon Electrodes for Na-Ion Batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(22), 11748-11754.
20. Wan, Y., Shi, Y., Zhao, D., Designed synthesis of mesoporous solids via nonionic-surfactant-templating approach. *Chem. Commun*., 2007, (9), 897-926.
21. Wan, Y., Zhao, D., On the Controllable Soft-Templating Approach to Mesoporous Silicates. Chem. Rev., 2007, 107(7), 2821-2860.
22. Zhao, D., Feng, J., Huo, Q., Melosh, N., Fredrickson, G. H., Chmelka, B. F., Stucky, G. D., Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores. *Science*, 1998, 279(5350), 548-552.
23. Yan, K., Kong, L., Dai, Y., Shi, M., Shen, K., Hu, B., Luo, Y., Kang, L., Design and preparation of highly structure-controllable mesoporous carbons at the molecular level and their application as electrode materials for supercapacitors. *J. Mater. Chem. A*, 2015, 3(45), 22781-22793.
24. Deng, Y., Yu, T., Wan, Y., Shi, Y., Meng, Y., Gu, D., Zhang, L., Huang, Y., Liu, C., Wu, X., Zhao, D., Ordered Mesoporous Silicas and Carbons with Large Accessible Pores Templated from Amphiphilic Diblock Copolymer Poly(ethylene oxide)-b-polystyrene. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(6), 1690-1697.
25. Meng, Y., Gu, D., Zhang, F., Shi, Y., Yang, H., Li, Z., Yu, C., Tu, B., Zhao, D., Ordered Mesoporous Polymers and Homologous Carbon Frameworks: Amphiphilic Surfactant Templating and Direct Transformation. *Angew. Chem., Int. Ed.,* 2005, 44(43), 7053-7059.
26. Liu, R., Shi, Y., Wan, Y., Meng, Y., Zhang, F., Gu, D., Chen, Z., Tu, B., Zhao, D., Triconstituent Co-assembly to Ordered Mesostructured Polymer−Silica and Carbon−Silica Nanocomposites and Large-Pore Mesoporous Carbons with High Surface Areas. *J. Am. Chem. Soc*., 2006, 128(35), 11652-11662.
27. Wang, C., Zhao, Y., Zhou, L., Liu, Y., Zhang, W., Zhao, Z., Hozzein, W. N., Alharbi, H. M. S., Li, W., Zhao, D., Mesoporous carbon matrix confinement synthesis of ultrasmall WO3 nanocrystals for lithium ion batteries. *J. Mater. Chem. A,* 2018, 6(43), 21550-21557.
28. Dong, Y., Zhan, X., Niu, X., Li, J., Yuan, F., Zhu, Y., Fu, H., Facile synthesis of Co-SBA-16 mesoporous molecular sieves with EISA method and their applications for hydroxylation of benzene. *Microporous Mesoporous Mater.,* 2014, 185, 97-106.
29. Wilson, B. E., Rudisill, S. G., Stein, A., Use of a sacrificial layer for an efficient EISA synthesis of mesoporous carbon. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2014, 197, 174-179.
30. Nanaji, K., Jyothirmayi, A., Varadaraju, U., Rao, T. N., Anandan, S., Facile synthesis of mesoporous carbon from furfuryl alcohol-butanol system by EISA process for supercapacitors with enhanced rate capability. *J. Alloys Compd*, 2017, 723, 488-497.
31. Pan, J. H., Zhao, X., Lee, W. I., Block copolymer-templated synthesis of highly organized mesoporous TiO2-based films and their photoelectrochemical applications. *Chem. Eng. J*, 2011, 170(2-3), 363-380.
32. Kresge, C. T., Leonowicz, M. E., Roth, W. J., Vartuli, J. C., Beck, J. S., Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature*, 1992, 359(6397), 710-712.
33. Beck, J. S., Vartuli, J. C., Roth, W. J., Leonowicz, M. E., Kresge, C. T., Schmitt, K. D., Chu, C. T. W., Olson, D. H., Sheppard, E. W., McCullen, S. B., Higgins, J. B., Schlenker, J. L., A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates. *J. Am. Chem. Soc.,* 1992, 114(27), 10834-10843.
34. Yu, K., Hurd, A. J., Eisenberg, A., Brinker, C. J., Syntheses of Silica/Polystyrene-block-Poly(ethylene oxide) Films with Regular and Reverse Mesostructures of Large Characteristic Length Scales by Solvent Evaporation-Induced Self-Assembly. *Langmuir*, 2001, 17(26), 7961-7965.
35. Yu, K., Smarsly, B., Brinker, C., Self-Assembly and Characterization of Mesostructured Silica Films with a 3D Arrangement of Isolated Spherical Mesopores. *Adv. Funct. Mater.,* 2003, 13(1), 47-52.
36. Templin, M., Franck, A., Du Chesne, A., Leist, H., Zhang, Y., Ulrich, R., Schadler, V., Wiesner, U. Organically Modified Aluminosilicate Mesostructures from Block Copolymer Phases. *Science*, 1997, 278(5344), 1795-1798.
37. Zeng, S., Liu, S., Qi, Y., Cui, L., Dai, Q., Bai, C., Facile synthesis of hierarchically porous carbonaceous materials derived from olefin/aldehyde precursors using silica as templates. *RSC Adv.,* 2018, 8(21), 11462-11468.
38. Matsuno, T., Kuroda, Y., Kitahara, M., Shimojima, A., Wada, H., Kuroda, K., A Single-Crystalline Mesoporous Quartz Superlattice. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2016, 55(20), 6008-6012.
39. Kim, K., Park, B., Kim, J., Seok, H., Kim, T., Jo, C., Kim, J. K.,

Block Copolymer-Directed Facile Synthesis of N-Doped Mesoporous Graphitic Carbon for Reliable, High-Performance Zn Ion Hybrid Supercapacitor. *ACS Appl. Mater. Interfaces*,2023, 15(50), 57905-57912.

40. Kim, J., Kim, K., Yoon, H., Park, S., Woo, D., Jo, H., Jo, C., Kim, J. K., Ultrahigh mass loading, binder-free synthetic approach for mesoporous graphitic carbon in 3D current collector for high energy lithium-ion batteries. *J. Mater. Chem. A*, 2025, 13(6), 4521-4529.
41. Kim, K., Kim, J., Choi, C., Yoon, H. K., Go, M. C., Lee, J., Kim, J. K., Seok, H., Kim, T., Wu, K., Kim, S. H., Kim, Y. M., Kwon, J. H., Moon, H. C., Soft Template-Assisted Fabrication of Mesoporous Graphenes for High-Performance Energy Storage Systems. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(41), 46994-47002.
42. Zhou, Z., Liu, T., Khan, A. U., Liu, G., Block copolymer–based porous carbon fibers. *Sci. Adv.*, 2019, 5(2), eaau6852.