

레독스 흐름 전지용 미세다공성 고분자 분리막

Microporous Polymer Membranes for Redox Flow Batteries

이태훈 | Tae Hoon Lee

Department of Future Energy Engineering, Sungkyunkwan University
2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi 16419, Korea
E-mail: thoonlee@skku.edu

1. 서론

대규모 장주기 에너지 저장 기술은 전력망 안정성과 재생에너지 확대를 위한 유망한 해법으로서, 특히 레독스 흐름 전지(redox flow battery, RFB)의 중요성이 부각되고 있다.¹ 전극, 집전체, 개스킷, 분리막으로 구성되는 셀 스택은 전해액과 함께 RFB의 효율과 안정성을 결정하는 핵심 요소이며,² 특히 분리막은 양극과 음극 전해액을 물리적으로 차단하면서 선택적인 이온 전도를 가능하게 하여 RFB의 전압 효율, 쿨롱 효율, 에너지 효율, 그리고 장기 안정성을 좌우하는 결정적 역할을 한다.³

분리막 소재로써, 현재까지는 높은 수소이온 전도도와 화학적 안정성을 갖춘 과불소술폰산계 분리막(예: Nafion)이 주로 활용되어 왔으나, 과도한 비용, 환경적 염려, 낮은 이온 선택성으로 인한 레독스 활성종의 교차이동(crossover) 문제 등으로 대규모 상용화에는 한계가 뚜렷하다.³ 이러한 문제를 극복하기 위해 탄화 수소계 고분자막, 나노여과막, 복합막 등 다양한 구조의 분리막이 개발되었으나,⁴ 여전히 이온 전도도와 선택성 간의 상충관계(trade-off)에 제약을 받고 있다.^{5,6} 또한 실제 RFB 운전 환경에서는 전해질 농도, 전위 창, 산화·환원 반응에 따른 열화 등 다양한 요인이 성능에 영향을 미치므로, 소재 본래의 물성뿐 아니라 실사용 조건에서의 안정성 확보가 중요하다.³⁻⁶

이러한 맥락에서, 기체 분리막 분야에서 우수한 성능을 보여온 미세다공성 고분자(polymer of intrinsic microporosity, PIM)는 강직하고 뒤틀린 분자 골격과 미세 기공 구조를 통해 높은 이온 전도도와 효과적인 분리 성능을 동시에 구현할 수 있는 가능성을 제시한다.⁷ 미세다공성 고분자는 기존 이온교환막 고분자 소재와 달리 정밀한 기공 제어를 통해 레독스 활성종의 교차이동을 억제할 수 있으며, 동시에 빠른 이온 수송을 유지할 수 있다는 점에서 주목받고 있다.^{5,6} 최근 연구에서는 이러한 PIM 기반 분리막을 실제 전지에 적용하여 교차이동 억제와 장기 사이클 안정성 향상을 확인하여 그 가능성을 입증하고 있다. 본 특집에서는 레독스 흐름 전지용 미세다공성 고분자 분리막 연구의 최신 동향을 체계적으로 정리하고, 기존 및 차세대 분리막과 비교하여 그 장점을 논의하며, 향후 대규모 에너지 저장 시스템으로의 실용화를 위한 도전과제를 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 RFB 기술의 필요성

재생에너지의 급격한 확대는 전력망의 간헐성과 불안정성을 심화시키고 있으며, 이를 보완하기 위한 장주기

Author



이태훈

2016 한양대학교 에너지공학과 (학사)
2021 한양대학교 에너지공학과 (박사)
2022-2025 매사추세츠 공과대학교(MIT) 화학공학과 (Post-Doc.)
2025-현재 성균관대학교 미래에너지공학과 조교수

에너지 저장 기술의 중요성이 날로 커지고 있다.¹ 기존의 리튬이온전지 기반 에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)는 높은 에너지 밀도와 효율적 전력 변환 측면에서 장점이 있지만, 수천 시간 이상의 긴 운전 수명과 에너지·출력의 독립적 설계라는 관점에서는 한계가 뚜렷하다.⁸ 이러한 맥락에서 레독스 흐름 전지(RFB)는 전해질 용액에 레독스 활성종을 저장하고 외부 탱크와 셀 스택을 통해 충방전을 수행하는 독창적 구조 덕분에, 전력망 차원의 대규모 저장 장치로서 주목받아 왔다.^{1,8} 특히 출력은 셀 스택의 크기에 의해, 에너지 용량은 전해질 탱크의 크기에 의해 각각 독립적으로 결정되므로 다양한 시간대별 수요 대응에 유연성을 제공한다.

현재까지 가장 성숙한 기술은 바나듐 레독스 흐름 전지 RFB(VRFB)이다.⁸ VRFB는 동일한 원소의 서로 다른 산화수를 활용하기 때문에 전해질 교차이동 시에도 회생이 가능하다는 장점을 지니며, 수 MW급 규모까지 실증이 진행되어 상용화에 근접한 단계에 있다. 그러나 바나듐 전해질의 가격 변동성과 용해도의 한계, 낮은 에너지 밀도(약 15–25 Wh L⁻¹)로 인해 비용 및 설치 면적 측면에서 한계가 지적된다.⁹

이러한 제약을 극복하기 위해 최근에는 수계 유기 레독스 흐름 전지(aqueous organic RFB, AORFB)가 활발히 연구되고 있다. AORFB는 저비용·지구상 풍부 원소 기반의 유기 분자를 전해질로 활용하여 원가 절감과 지속가능성 확보에 유리하며, 다양한 분자 설계를 통해 전위 창 확장과 고용해도를 추구할 수 있다는 특징이 있다.¹⁰ 다만 분자의 화학적 안정성, 전해질의 장기적 내구성, 막을 통한 교차이동 억제 등 아직 해결해야 할 과제가 많아 기술 성숙도는 VRFB에 비해 초기 단계에 머물러 있다.^{5,8,10}

2.2 RFB 셀 스택 내 분리막의 중요성

레독스 활성종을 포함한 전해액에 더하여, 레독스 흐름 전지의 핵심 구성 단위인 셀 스택은 전지의 출력과 효율을 결정하는 중심 모듈로, 전극, 집전체, 개스킷, 그리고 분리막으로 이루어진다.² 전극은 전해액 내 레독스 활성종과의 전기화학적 반응이 일어나는 공간을 제공하며, 집전체는 반응에서 발생하거나 소비되는 전자를 외부 회로와 연결해주는 역할을 한다. 개스킷은 셀의 기계적 안정성과 밀폐성을 확보하여 장기 운전 시 발생할 수 있는 누액과 단락을 방지한다. 이와 함께 분리막은 양극과 음극 전해액을 물리적으로 분리하면서, 필요한 이온만 선택적으로 이동시켜 회로 내 전류의 연속성을 보장하는 장치로서, 셀 스택 내에서 가장 중요한 역할을 담당한다(그림 1).^{3,4}

분리막의 성능은 RFB의 전반적 효율을 직접적으로 좌우한다. 우선, 높은 이온 전도도는 내부 저항을 줄여 전압 효율 및 에너지 효율을 향상시키며, 선택적인 이온 수송은 불필요한 부반응을 억제해 쿨롱 효율과 전지의 안정성을 유지한다. 반면, 전해질 내 레독스 활성종의 교차이동이 발생하면 전지

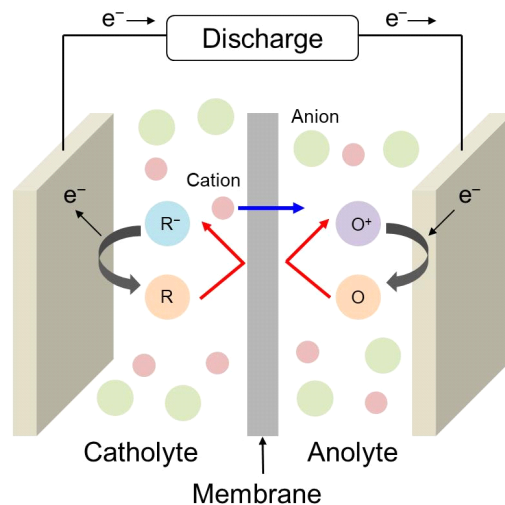


그림 1. 레독스 흐름 전지(RFB)의 개략도 및 분리막의 역할.

내부에서 자체 방전이 일어나고, 장기 사이클 동안 전해액 조성이 불균형하게 변해 용량 손실이 누적된다. 따라서, 분리막은 이온 전도도와 선택성 사이의 균형을 정밀하게 달성해야 한다는 점에서 RFB 성능의 병목 요소로 작용한다.^{3,4}

현재 상용화된 대표적 분리막은 과불소술포산계 이오노머(Nafion 등)로, 우수한 수소이온 전도도와 화학적 안정성 덕분에 VRFB에 널리 적용되어 왔다. 그러나 이들 막은 높은 가격과 환경적 부담 외에도, 다가 금속 이온이나 유기 분자 등 레독스 활성종에 대해 충분한 선택성을 제공하지 못해 교차이동 문제를 해결하지 못한다는 한계가 있다. 이러한 이유로 탄화수소계 이온교환막, 나노여과막, 다공성 지지체 기반 복합막 등 다양한 대안이 연구되고 있지만, 이온 전도도와 선택성 사이의 상충관계 때문에 아직 뚜렷한 해결책은 제시되지 못하고 있다.^{3,4}

또한 실제 운전 환경에서의 분리막 안정성 역시 중요한 고려 요소이다. 전해질 농도, 전위 창, 반복적인 산화·환원 반응에 따른 화학적 스트레스, 그리고 장시간 유동 환경에서의 기계적 내구성은 분리막 열화의 주요 원인이 된다. 따라서 새로운 소재 설계에서는 단순히 실험실 수준의 초기 전도도나 선택성을 넘어, 장기 운전에서 안정적으로 성능을 유지할 수 있는 내화학적·내기계성이 동시에 확보되어야 한다.^{3,4}

2.3 미세다공성 고분자(PIM)

이러한 맥락에서 최근 기체분리 분야에서 큰 주목을 받아온 미세다공성 고분자(PIM)가 RFB 분리막의 유망한 후보로 떠오르고 있다. PIM은 기본적으로 분자 사슬이 강직하고 뒤틀려 있어 조밀한 배열을 방해하는 구조적 특성을 지닌다. 이로 인해 고분자 매트릭스 내에 미세기공(IUPAC 정의상 <2 nm)이 형성되며, 일반적으로 기공 크기는 분자 크기 수준으로, 비표면적은 BET(Brunauer-Emmett-Teller)법 측정 기준

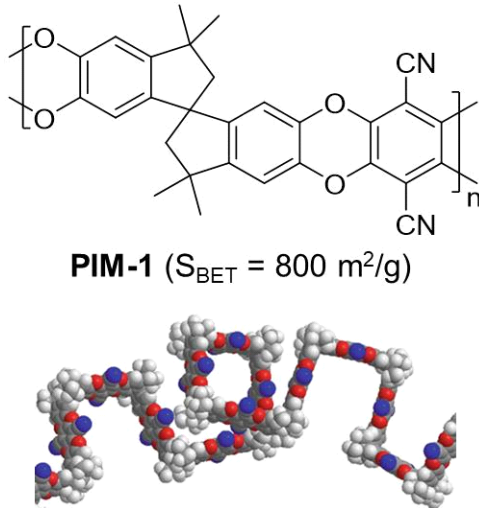


그림 2. 대표적인 미세다공성 고분자(PIM)인 PIM-1의 구조.

수백 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ 이상에 달한다.⁷ 이러한 풍부한 자유체적과 미세다공성 덕분에, PIM 기반 분리막(예: PIM-1, 그림 2)은 기존의 폴리설폰, 셀룰로오스 아세테이트 등 전통적인 상용 고분자보다 수십 배에서 수천 배 높은 기체 투과도를 보여왔다.¹¹ 또한, 대부분의 PIM은 용액 공정성을 여전히 보유하여, 용액 캐스팅 기반 물투를 공정 기술을 통해 대면적 분리막 제조가 가능하다는 실용적 장점을 지닌다.^{7,11}

분자 설계 측면에서, PIM은 보통 사다리형(ladder) 혹은 반사다리형(semi-ladder) 구조를 기반으로 합성된다. 강직성과 입체장애를 제공하는 단량체들을 선택적으로 도입해 고분자 사슬의 밀집을 억제하고, 그 결과 무질서한 미세기공 네트워크가 형성된다. 주요 단량체 예시로는 spirobisindane(SBI), spirobifluorene(SBF), binaphthyl, hexaphenylbenzene(HPB), triptycene, Tröger's base(TB), tetraphenylethylene(TPE) 등이 있으며, 최근에는 CANAL 반응을 이용한 norbornyl benzocyclobutene 기반 구조도 보고되고 있다.^{7,12} 이들 단량체는 모두 고분자의 구조적 강직성과 비대칭성을 유도하여, 높은 투과성과 분자체(molecular sieving) 특성을 동시에 발현하는 데 기여한다.

이처럼 독특한 분자 골격과 미세구조 덕분에 PIM은 초기에는 기체 흡착·축매 분야에서 연구되었으나, 곧 수소 저장, 이산화탄소 포집, 오염물질 제거, 전기화학, 발광 소재 등으로 적용 범위가 빠르게 확장되었다.⁷ 특히 분리막 분야는 PIM의 구조적 특성과 가장 직접적으로 연결되는 응용처로, 높은 자유체적과 미세기공을 통한 분자 수준의 분리 능력 덕분에 CO_2 포집, 수소 정제, 유기용매 나노여과 등 다양한 영역에서 두각을 나타내고 있다.^{7,11,12} 더 나아가, PIM은 단량체 선택이나 합성 경로를 달리함으로써 화학적 성질을 폭넓게 조절할 수 있고, 후기 개질(post-synthetic modification, PSM)을 통해 친수성·소수성 조절, 전하 도입, 금속-리간드 결합 부여 등

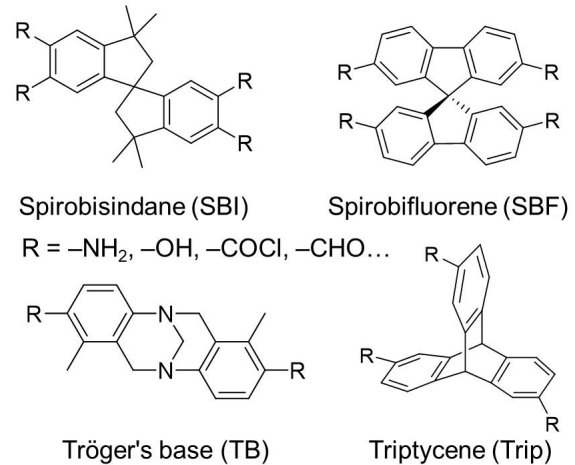


그림 3. PIM을 구성하는 대표적인 분자 구조.

원하는 기능성을 손쉽게 부여할 수 있다.¹³ 이러한 높은 구조 설계 자유도와 기능화 가능성은 특정 분리 시스템에 최적화된 성능 발현을 가능케 한다.

2.4 PIM 기반 RFB용 분리막

RFB 분리막 소재로서 PIM의 가능성은 크게 세 가지 측면에서 주목할 만하다.^{5,6} 첫째, 강직한 골격에 의해 형성된 미세기공 구조는 레독스 활성종과 같은 큰 분자의 이동을 효과적으로 차단하면서도, 회로 내 전류 전달을 위한 작은 이온(예: 양성자, 알칼리 금속 이온 등)의 빠른 이동을 허용한다. 이는 기존 이온교환막에서 가장 큰 난제로 지적된 전도도-선택성 간 상충관계를 극복할 수 있는 기반을 제공한다. 둘째, PIM은 용액 공정성이 우수하여 스케일업 및 대면적 셀 스택 적용이 용이하다는 장점을 지닌다. 이는 전지용 분리막 상용화에서 반드시 필요한 요건이다. 셋째, PIM은 화학적 구조 설계와 개질을 통해 다양한 전해질 환경(산성, 중성, 알칼리성)에 대응할 수 있도록 조정이 가능하며, 이는 VRFB뿐 아니라 AORFB, 비수계 RFB(NARFB) 등 다양한 전해질 시스템에 맞춘 맞춤형 분리막 개발을 가능하게 한다.

최근 PIM의 독특한 미세다공성 구조와 화학적 기능화 가능성을 RFB 분리막으로 적용하려는 연구가 본격적으로 보고되고 있다. 이들은 기존 고분자 기반 이온교환막의 전도도-선택성 간의 상충관계 난제를 극복하고, 장기 안정성과 높은 에너지 효율을 달성하기 위한 새로운 전략을 제시한다. 여기서는 대표적 연구 네 편을 중심으로 PIM 기반 RFB 분리막의 발전 상황을 정리한다.

Tan 등은 2020년 최초로 친수성 PIM 기반 분리막을 AORFB에 적용하였다.⁶ 대표적인 PIM 중 하나인 PIM-1은 소수성 특성 때문에 수계 전해질 적용에 제약이 있었는데, 연구진은 친수성 작용기를 도입하여 이 문제를 해결하였다. 그 결과 높은 양성자 전도도와 낮은 전해질 활성종 투과도를 동시에 확보할 수

있었으며, 상용 Nafion 분리막 대비 레독스 활성종의 교차 이동 현상이 크게 억제되었다. 실제 전기 구동 시 쿨롱 효율과 에너지 효율 모두 향상되었고, 장기 사이클 안정성 또한 우수하게 유지되었다. 저자들은 특히 PIM 기반 분리막의 미세기공 구조가 이온 크기 차이에 따른 선택적 투과에 효과적임을 강조하였다. 초기 충·방전 사이클에서 안정적인 전압 효율이 관찰되었고, 장시간 운전에서도 팽윤이나 기계적 열화가 거의 발생하지 않았다. 이는 PIM이 단순한 기체 분리 소재를 넘어 실제 전해질 환경에서 전도도-선택성 상충관계를 완화할 수 있음을 보여준 중요한 사례이다.

Zuo 등은 트리아진(triazine) 골격 구조를 갖는 PIM 계열 고분자를 도입하여, 기존 PIM의 팽윤과 구조적 열화 문제를 해결하고자 하였다.¹⁴ 이 고분자는 초미세기공(크기 <0.7 nm) 내에 제한된 통로(confined channel)를 형성하여 마찰 저항이 거의 없는 이온 수송을 가능하게 하였다. K^+ 전도도는 $30\text{--}55\text{ mS cm}^{-1}$ 수준으로 보고되었고, 동시에 DHAQ(2,6-dihydroxyanthraquinone)와 페로시아나이드와 같은 유기 레독스 종의 투과가 효과적으로 억제되었다. 이를 탑재한 AORFB의 경우 500 mA cm^{-2} 라는 매우 높은 전류밀도 조건에서도 용량 활용률과 에너지 효율이 유지되었으며, 이는 Nafion과 비교해도 우수한 선택성과 낮은 저항을 동시에 달성한 결과였다(그림 4). 저자들은 특히 미세구조와 이온 수송 특성 간의 상관관계를 정량적으로 분석하여, 분자 수준 설계가 실제 전기 성능으로 직결될 수 있음을 입증하였다. 또한 합성 경로나 단량체 변형을 통해 기능성을 추가할 수 있어 다양한 전해질 시스템에 적용할 수 있는 맞춤형 분리막으로 확장 가능하다는 점도 제시하였다.

Ye 등은 PSM 기반 술폰화(sulfonation) 전략으로 기존 PIM의 전도도와 소수성 문제를 극복하고자 하였다.¹⁵ 술폰산기가 도입된 PIM은 기본 골격의 강직성과 뒤틀린 구조를 유지하면서도 친수성 채널을 형성하여, 활성종 교차이동을

효과적으로 억제하는 동시에 수십 mS cm^{-1} 수준의 안정적인 이온 전도도를 보였다. 이러한 특성은 AORFB 구동 시 높은 쿨롱 효율과 에너지 효율로 이어졌고, 장기 사이클에서도 용량 유지율이 뛰어났다. 특히 술폰화 정도에 따라 전도도와 선택성이 체계적으로 조정됨이 확인되어 구조-성능 상관관계를 명확히 제시하였다. 이는 PIM 분리막이 단순히 기능성이 부여된 소재가 아니라 실제 전기 요구 조건에 맞춰 성능을 조절할 수 있는 맞춤형 플랫폼으로 활용될 수 있음을 시사한다. 더 나아가, 술폰화된 PIM은 Nafion 대비 원가 절감 측면에서도 장점을 지니며, 대규모 실용화를 위한 지속가능한 대안으로 평가된다.

마지막으로, Wang 등은 PIM-1 기반 고분자를 수화 구조를 정밀하게 제어하는 방향으로 개질하였다(그림 5).⁵ 연구진은 미세기공 내에 친수성 작용기를 선택적으로 도입하여 물 분자의 국소적 응집(clustering)을 유도함으로써, 이온 전도 경로와 활성종 차단 성능을 동시에 최적화하였다. 그 결과 AORFB에서 상용 Nafion보다 높은 쿨롱 효율과 에너지 효율을 달성하였으며, 장기간 운전에서도 안정적인 성능을 유지하였다. 특히, 수화수(hydration number) 제어를 통해 미세구조에서 전도성과 선택성을 조절할 수 있음이 입증되었는데, 이는 전도도-선택성 상충관계를 구조적 수화 조절이라는 새로운 접근으로 해결한 것이다. 또한 이러한 전략은 다양한 친수성 작용기의 도입으로 확장할 수 있어, 여러 전해질 환경에서 활용 가능한 범용적 설계 방안을 보여주었다.

종합하면, 상기 네 연구는 모두 전도도-선택성 상충관계를 극복하는 것을 공통 목표로 삼았으며, 접근 방식은 (1) 친수성 작용기 도입(Tan, Ye),^{6,15} (2) 강직한 골격 구조 설계(Zuo),¹⁴ (3) 수화구조 제어(Wang)로 구분할 수 있다.⁵ 이러한 연구들은 PIM 기반 분리막이 기존 Nafion 등 상용 이온교환막 및 고분자 막소재의 한계를 뛰어넘어 차세대 RFB 실용화를 위한 유력한 후보임을 분명히 보여준다.

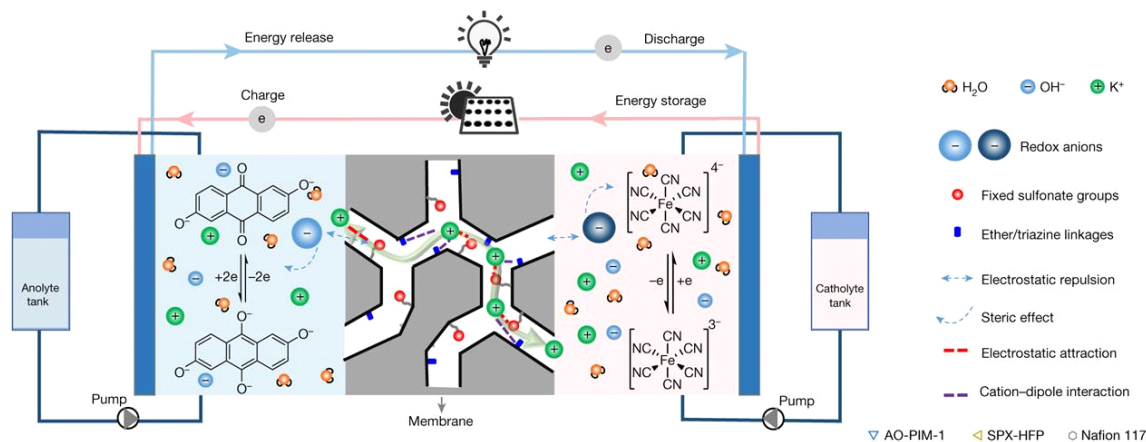


그림 4. Triazine 골격 기반 분리막(SCTF-BP)을 탑재한 AORFB 및 분리막 매트릭스를 통한 선택적인 K^+ 이온 전도의 개략도. 음극 전해액(catholyte)은 페로시아나이드이고, 양극 전해질(anolyte) 분자는 DHAQ이다.¹⁴

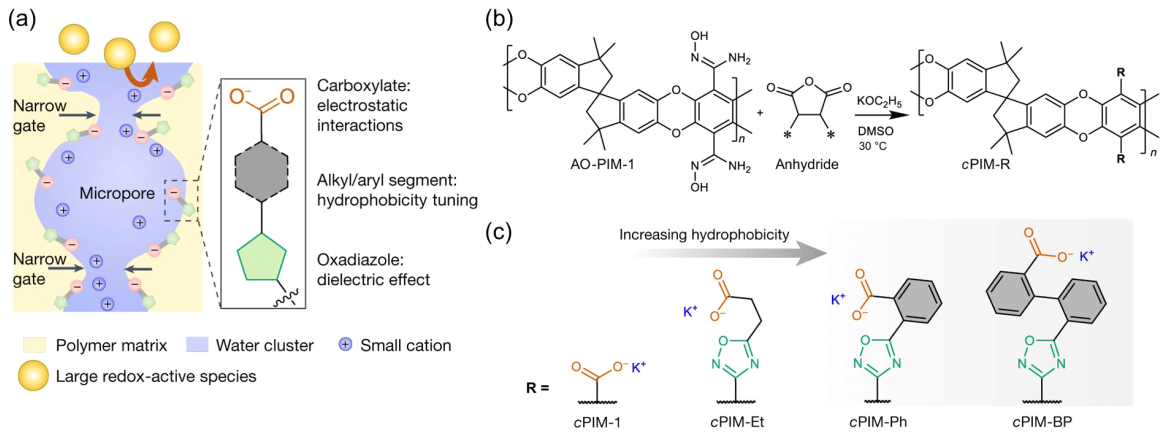


그림 5. (a) PIM 내 수화된 미세기공 구조의 개략도. (b) 소수성 정도가 다른 결가치(pendant group)를 포함하는 cPIM의 합성 경로 및 화학 구조.⁵

3. 결론

본 특집에서는 RFB용 분리막으로서 미세다공성 고분자 (PIM)가 지닌 가능성과 최근 연구 성과를 정리하였다. 기존 상용 분리막인 Nafion은 높은 전도도를 보유하나, 높은 비용과 낮은 선택성, 환경적 부담으로 인해 대규모 적용에 한계가 있었다. 이에 반해 PIM 기반 분리막은 강직하고 뒤틀린 분자 골격으로 형성된 미세기공 구조를 통해 전도도-선택성 상충관계를 완화할 수 있는 독창적 해법을 제시한다. 본 특집에 보고된 연구들은 각각 친수성 작용기 도입, 강직한 프레임워크 설계, 후기 개질 기반 기능화, 수화구조 제어를 통해 PIM의 성능을 체계적으로 확장하였으며, 실제 RFB 구동에서 효율과 안정성 향상을 입증하였다. 이들 결과는 PIM이 단순한 기체 분리 소재를 넘어 차세대 대규모 에너지 저장 장치의 핵심 분리막 후보로 자리매김할 수 있음을 보여준다. 그러나 여전히 장기 내화학성 검증, 대면적 제조 및 모듈화 기술, 다양한 전해질 시스템과의 호환성 확보가 해결해야 할 주요 과제로 남아 있다. 향후 고분자 합성, 전기화학적 분석, 막공학의 융합 연구가 지속적으로 이루어진다면, PIM 기반 분리막은 RFB 상용화와 더불어 지속가능한 에너지 전환을 견인하는 핵심 소재로 발전할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. P. Alotto, M. Guarnieri, and F. Moro, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **29**, 325 (2014).
2. X. Ke, J. M. Prah, J. I. D. Alexander, J. S. Wainright, T. A. Zawodzinski, and R. F. Savinell, *Chem. Soc. Rev.*, **47**, 8721 (2018).
3. P. Xiong, L. Zhang, Y. Chen, S. Peng, and G. Yu, *Angew. Chem.*

Int. Ed., **60**, 24770 (2021).

4. X. Li, H. Zhang, Z. Mai, H. Zhang, and I. Vankelecom, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 1147 (2011).
5. A. Wang, C. Breakwell, F. Foglia, R. Tan, L. Lovell, X. Wei, T. Wong, N. Meng, H. Li, A. Seel, M. Sarter, K. Smith, A. Alvarez-Fernandez, M. Furedi, S. Guldin, M. M. Britton, N. B. McKeown, K. E. Jelfs, and Q. Song, *Nature*, **635**, 353 (2024).
6. R. Tan, A. Wang, R. Malpass-Evans, R. Williams, E. W. Zhao, T. Liu, C. Ye, X. Zhou, B. Primera Darwich, Z. Fan, L. Turcani, E. Jackson, L. Chen, S. Y. Chong, T. Li, K. E. Jelfs, A. I. Cooper, N. P. Brandon, C. P. Grey, N. B. McKeown, and Q. Song, *Nat. Mater.*, **19**, 195 (2020).
7. N. B. McKeown, *Polymer*, **202**, 122736 (2020).
8. R. M. Darling, K. G. Gallagher, J. A. Kowalski, S. Ha, and F. R. Brushett, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 3459 (2014).
9. K. Lourenssen, J. Williams, F. Ahmadpour, R. Clemmer, and S. Tasnim, *J. Energy Storage*, **25**, 100844 (2019).
10. D. G. Kwabi, Y. Ji, and M. J. Aziz, *Chem. Rev.*, **120**, 6467 (2020).
11. B. Comesana-Gándara, J. Chen, G. Bezzu, M. Carta, I. Rose, M. Ferrari, E. Esposito, A. Fuoco, J. C. Jansen, and N. B. McKeown, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 2733 (2019).
12. Y. Wang, B. S. Ghanem, Z. Ali, K. Hazazi, Y. Han, and I. Pinnau, *Small Struct.*, **2**, 2100049 (2021).
13. T. H. Lee, T. Joo, P. Jean-Baptiste, P. A. Dean, J. Y. Yeo, and Z. P. Smith, *J. Mater. Chem. A*, **12**, 24519 (2024).
14. P. Zuo, C. Ye, Z. Jiao, J. Luo, J. Fang, U. S. Schubert, N. B. McKeown, T. L. Liu, Z. Yang, and T. Xu, *Nature*, **617**, 299 (2023).
15. C. Ye, A. Wang, C. Breakwell, R. Tan, C. G. Bezzu, E. Hunter-Sellers, D. R. Williams, N. P. Brandon, P. A. A. Klusener, A. R. Kucernak, K. E. Jelfs, N. B. McKeown, and Q. Song, *Nat. Commun.*, **13**, 3184 (2022).