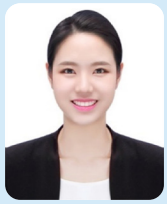
수전해용 분리막 성능 개선을 위한 다공성 지지체 기반 강화복합막 전략과 최신 기술 동향



이지현

- 2020. 순천향대학교 신소재공학과 학사
- 2021–현재. 한국생산기술연구원(KITECH) 섬유솔루션부문 학연협동과정
- 2021–현재. 한양대학교 신소재공학과 석박통합과정

최유리

- 2012. 전북대학교 섬유소재시스템공학과 학사
- 2014. 전북대학교 일반대학원 유기소재 파이버공학과 석사
- 2014–현재. 한국섬유개발연구원(KTDI) 선임연구원

윤기로

- 2012. 한양대학교 신소재공학과 학사
- 2014. 한국과학기술원(KAIST) 신소재공학과 석사
- 2018. 한국과학기술원(KAIST) 신소재공학과 박사
- 2018. 한국과학기술연구원(KIST) 수소연료전지연구단 박사후연구원
- 2018–2025. 한국생산기술연구원(KITECH) 섬유솔루션부문 수석연구원
- 2025–현재. 건국대학교 재료공학과 조교수

1. 서 론

기후변화 대응을 위한 글로벌 정책과 기술적 노력은 2000년대 이후 본격적으로 확대되고 있으며, 최근에는 탄소중립(net-zero) 달성을 위한 핵심 에너지 캐리어(energy carrier)로서 그린수소(green hydrogen)의 중요성이 급격히 부각되고 있다. 그린수소는 태양광 및 풍력 에너지와 같은 재생 가능한 친환경 전력원을 이용하여 수전해(water electrolysis)로 생산되는 수소로, 기존 화석 연료 기반 수소 생산방식 대비 탄소 배출이 근본적으로 차단된다는 장점을 가진다. 또한 지리적·자원적 제약을 받지 않기 때문에 발전 시스템, 분산형 전력원, 수송·모빌리티 등 다양한 분야로의 활용 가능성이 높아 에너지 전환의 핵심 축으로 평가되고 있다. 그러나 재생에너지 특유의 간헐성(intermittency)과 출력 변동성은 수전해 시스템의 안정적 운전 및 효율적 가동률 확보에 한계로 작용한다. 이러한 이유로, 최근에는 넓은 부하 운전 범위(wide load range)에서도 안정성을 유지할 수 있는 고내구성 수전해 시스템 개발이 필수 과제로 대두되고 있으며, 이를 달성하기 위한 핵심 소재·부품에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1].

부하 변동에 대응 가능한 수전해 기술은 이온전도성 분리막을 통한 전하 운반과 전극에서의 산화·환원 전기

화학 반응을 기반으로 수소와 산소를 생산하는 기술로, 분리막의 특성은 시스템의 효율, 안정성, 그리고 장기 내구성을 좌우하는 핵심 요소이다. 이에 따라 분리막의 이온전도 메커니즘과 소재 특성에 기반하여 다양한 수전해 시스템이 개발되어 왔으며, 고분자 전해질막 기반의 양이온교환막(proton exchange membrane, PEM)과 음이온교환막(anion exchange membrane, AEM) 수전해 시스템이 그 대표적인 예이다. 또한, 고체 산화물(solid oxide) 분리막 기반의 수전해 기술 역시 고온 운전을 바탕으로 한 높은 에너지 효율성으로 많은 관심을 받고 있다. 본 글에서는 이러한 수전해 기술 중 고분자 전해질막 기반 수전해 시스템에 중점을 두고자 하며, 해당 분리막들은 선택적 이온 수송(selective ion transport), 전극 간 물리적 분리, 그리고 기체 크로스오버(crossover) 억제 기능을 동시에 수행함으로써, 수전해 설비의 안정성과 그린수소 생산 효율 향상을 가능하게 한다는 특징이 있다.

그러나 실제 운전 조건에서는 여전히 해결해야 할 기술적 한계가 존재한다. 저부하(low-load) 구간에서는 수소 및 산소의 상호 크로스오버로 인한 안정성 및 효율 저하, 고부하(high-load) 환경에서는 전극 및 전해질막의 구조적·화학적 열화(degradation)로 인한 수명 단축이 발생할 수 있다. 또한 수전해의 효율 향상을 위한 가압 운전 조건이 필수적으로 여겨지나, 이는 분리막을 중심으로 높은 차압(pressure drop)을 유도하여, 기체 크로스오버를 가속화시킨다. 이러한 문제는 장기 운전이 요구되는 재생에너지 연계형 수전해 시스템에서 더욱 심각하게 고려되어야 하는 요소로, 분리막의 내구성 향상 전략이 필수적이다. 이와 같은 한계를 극복하기 위한 기술적 접근으로, 수송용 연료전지에 활용되는 다공성 보강재를 적용한 '강화복합막(reinforced composite membrane, RCM)'이 최근 주목을 받고 있다. 강화복합막은 고분자 전해질막 내부에 고분자 섬유 기반의 다공성 보강 지지체(porous reinforcement)가 일체화된 구조로 설계되며, 이를 통해 막의 기계적 강도와 치수 안정성을 향상시킬 뿐만 아니라, 기체 크로스오버 억제 및 열·화학적 가속 열화의 저감, 장기 내구성 확보에 효과적으로 기여할 수 있는 전략이다.

본 원고에서는 고분자 전해질막 수전해 기술의 개요와 분리막의 역할, 그리고 강화복합막 기술의 개념 및 필요성을 정리하고, 이를 위한 연구개발 사례들과 수전해 기술 산업 동향을 종합적으로 고찰하고자 한다. 또한, 차세대 고성능 분리막 개발을 위해 해결해야 할 기술적 과제를 제시하고, 강화복합막이 수전해 기술뿐 아니라 다양한 산업 분야로 확장될 잠재력을 논의하고자 한다.

2. 고분자 전해질막 수전해를 활용한 그린수소 생산 기술

2.1. 고분자 전해질막 수전해 시스템의 구성 및 분리막의 역할

수전해는 전기 에너지를 통해 물을 산소와 수소로 분해하는 전기화학 공정으로, 태양광 및 풍력 에너지와 같은 재생 가능 전력을 직접 활용해 고순도 수소를 생산할 수 있는 기술이다. 고분자 전해질막 수전해 시스템 내에서 전기화학적 반응의 최소 단위인 셀(cell)은 양극(anode), 음극(cathode), 분리막(membrane), 다공성 확산층(porous transport layer, PTL), flow-field plate으로 구성된다. 평형 전압인 1.23 V보다 높은 셀 전압이 인가될 때 양극에서는 산소 발생 반응이, 음극에서는 수소 발생 반응이 진행되며($H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$), 전자는 외부 회로를 따라 이동하고 이온은 분리막을 따라 전도되어 전하의 중성이 유지된다. 이때 분리막은 선택적 이온 수송, 전극간 물리적 분리, 기체 크로스오버 억제를 동시에 수행하며 산소와 수소 기체 혼합을 차단하고, 이에 따른 폭발 위험을 낮추는 역할을 수행한다. 따라서, 분리막은 수전해 시스템의 전체 효율, 안정성, 그리고 장기 내구성을 좌우하는 핵심 요소이다.

양이온교환막(PEM) 수전해 시스템은 높은 전류밀도에서 대량 생산이 가능해 동일한 출력 대비 장치의 크기가 작은 편이며, 치밀한 고분자막으로 인해 최대 40 bar 수준의 고압에서도 효과적인 작동이 가능하고, 동적 부하 변화에 대한 응답성이 빠르다는 장점이 있다(*Figure* 1a). 일반적인 상용막은 Nafion™(Chemours)이라고 불리는 PFSA(perfluorosulfonic acid)계 이오노머(ionomer)로 이루어져 있으며 산성 분위기에서 수소이온(proton, H^+)만을 선택적으로 수송한다. 그러나 Nafion 115나 Nafion 117과 같이 100 μm 이상의 두꺼운 막의 사용은 기체 크로스오버를 억제시키는 반면 오믹(ohmic) 저항을 증가시켜 전류밀도 및 수소 생산 효율을 저하시키는 상충관계로 작용한다. 게다가 백금(Pt), 이리듐(Ir), 루테늄(Ru) 등의 귀금속 촉매의 사용은 가격 경쟁력을 감소시키는 요인으로 작용한다.

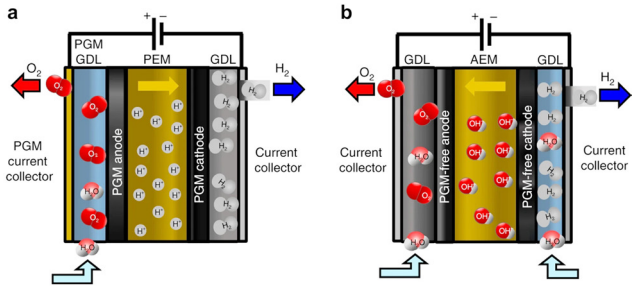


Figure 1. (a) 양이온 교환막 및 (b) 음이온 교환막의 구조 도식[2].

따라서 셀의 안정성과 수소 생산 효율 간의 균형과 비용 절감 확보는 기술적 과제로 남아있다.

음이온교환막(AEM) 수전해는 고가의 귀금속 촉매 사용으로 인한 비용 문제를 해결할 수 있는 대안으로 새롭게 등장한 차세대 기술이다(*Figure* 1b). AEM은 알칼리 환경에서 운전하므로 비귀금속 기반 촉매 및 저가의 금속 분리판의 사용이 가능하며, PEM과 마찬가지로 고분자막 형태이기 때문에 고압 환경에서도 원활한 운전이 가능하다. 그러나 음이온(anion, OH^-)의 큰 반경과 낮은 이동도에 기인한 낮은 이온전도도, 고습 환경에서의 과도한 부피 팽창 등은 화학적·기계적 안정성을 저하시키며, 결과적으로 막의 비가역적 크리프(creep) 변형을 초래할 수 있다. 현재 새로운 AEM 개발을 위해 다방면에서 연구가 이루어지고 있지만 여전히 낮은 기술 성숙도는 상용화에 큰 걸림돌로 작용하고 있어 셀의 안정성 확보를 위한 보완이 필요한 실정이다.

2.2. 강화복합 전해질막 기술

최근 전해질막의 한계를 극복하기 위한 전략으로, 모빌리티용 연료전지(PEMFC)에서 사용되고 있는 이오노머 막 사이에 섬유형 보강 지지체를 통합한 구조의 강화복합막이 큰 각광을 받고 있다(*Figure* 2a,b). 강화복합막은 막에 충분한 기계적 강도를 부여함으로써, 동일 두께 대비 기체 크로스오버를 대폭 감소시키고 고습 환경에서 막의 부피 팽윤을 제한할 수 있다. 게다가 다공성 지지체 내부로 치밀하게 형성된 고분자막에 의해 연속적인 이온 채널의 유지 및 막 열화의 효과적인 억제가 가능하다.

다공성 지지체로 가장 널리 사용되는 소재는 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene, PTFE) 기반 멤브레인이다. PTFE는 강한 C-F 결합에 기인한 우수한 내화학성 및 내수성으로

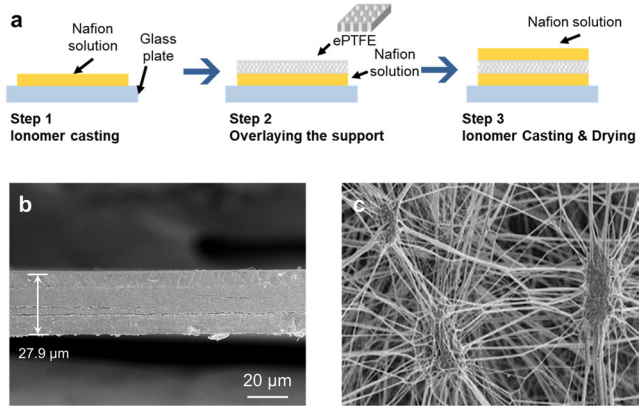


Figure 2. (a) 강화복합막의 제작 과정, (b) 3중 구조 강화복합막(Nafion XL)의 단면 SEM 이미지[3], (c) ePTFE 멤브레인의 표면 SEM 이미지[4].

이온의 수송을 방해하지 않으면서 견고한 구조 유지가 가능하다. 특히 연신 공정을 통해 제작된 expanded PTFE(ePTFE) 멤브레인은 매우 얇은 섬유질 형태의 fibril 다발과 아일랜드(island) 형태의 노드(node)로 이루어진 3차원 골격을 형성하고 있으며, fibril 사이에는 내부 기공 공간을 포함하고 있어 이오노머의 함침을 가능하게 한다(*Figure* 2c). 그러나 ePTFE 멤브레인의 nm 급 조밀한 기공과 매우 높은 소수성 표면은 이오노머 용액의 치밀한 함침을 방해하고, 균일한 연신을 통한 적절한 기공 크기와 두께 형성 및 안정적인 노드 분포의 제어가 기술적 난제로 여겨지고 있다.

2.3. 최신 연구 동향

앞선 상용 ePTFE 멤브레인의 한계들을 극복하기 위하여, 다공성 지지체 구조 설계 및 젖음성 개선과 이오노머 충진 기술의 정밀 제어를 통해 강화복합막의 내구성 및 안정성을 극대화하기 위한 연구들이 등장하고 있다.

국내 충남대학교, 한국화학연구원 공동연구팀은 화학기상증착(chemical vapor deposition, CVD) 기술을 통해 지지체 표면에 폴리파라-자일릴렌(poly(para-xylylenes, PPX))계 고분자층을 정밀하게 코팅하여 ePTFE 멤브레인의 낮은 친수성을 해결하기 위한 PEM 강화복합막 연구를 발표하였다(*Figure* 3a)[5].

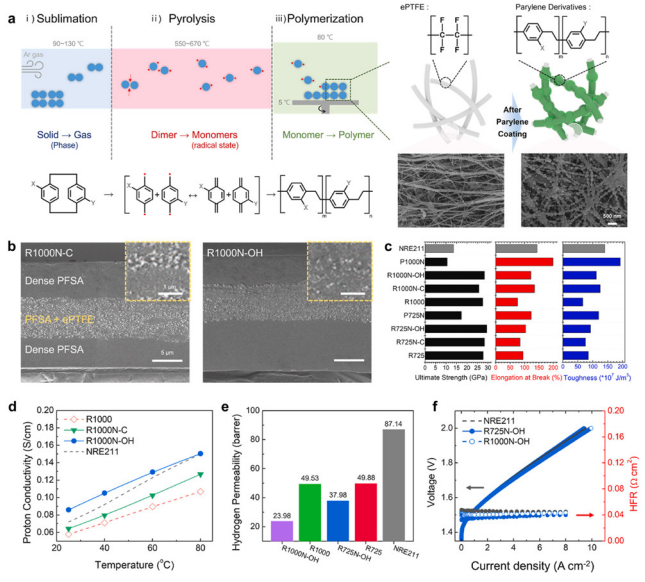


Figure 3. (a) CVD를 통한 PPX 코팅층의 제조 도식 및 코팅 전후 표면의 SEM 이미지, (b) PPX 코팅층이 도입된 강화복합막의 단면 SEM 이미지, (c) PPX 코팅층이 도입된 강화복합막을 포함한 다양한 막의 기계적 특성 비교, PPX 층 코팅 전후의 강화복합막과 상용막의 (d) 이온전도도 및 (e) 수소 투과도, (f) PPX 층 코팅 후 강화복합막과 상용막의 물 전기분해 성능 및 고주파 저항 결과[5].

특히 PPX층을 ePTFE 멤브레인의 표면에 수십 나노미터 두께로 증착함으로써 이오노머와의 계면 친화성이 효과적으로 개선되었으며(*Figure* 3b), 치밀하게 함침된 강화복합막에 의해 기계적 강도 또한 개선되는 거동을 보였다(*Figure* 3c). PPX층 도입 전후를 비교하였을 때 이온전도도는 약 1.8배 향상되었고(*Figure* 3d), 수소교차는 약 2.1배 감소한 것으로 평가되었다(*Figure* 3e). 수전해 셀 구동 시에도 낮은 전압 손실과 고주파 저항을 보이며(*Figure* 3f), PPX층이 지지체에 코팅됨으로써 강화복합막의 기계적 안정성 및 전기화학적 성능이 개선됨을 입증하였다.

최근 고려대학교 연구팀은 지지체 표면을 친수화한 후, 인터페이셜 멘슈트킨 반응(interfacial menshutkin reaction, iMen)을 통해 폴리쿼터너리 암모늄(polyquaternary ammonium, PQA) 네트워크를 PTFE 내부에 in-situ로 형성함으로써 ePTFE 멤브레인 자체의 낮은 이오노머 충진성을 개선한 AEM 강화복합막 연구를 소개하였다(*Figure* 4a)[6]. 실제로 멤브레인에 표면 친수기가 도입됨으로써 계면 결함이 눈에 띄게 감소하였으며(*Figure* 4b-g), 3차원의 이온전도성 네트워크가 연속적으로 구축됨에 따라 상용막인 FAA50에 비해 이온전도도가 향상된 것으로 나타났다(*Figure* 4h). *Figure* 4i에 나타나 있듯, 800 시간이 넘어가는 장기 수전해 구동 테스트에서도 성능이 지속적으로 유지되었으며, 이로써 표면 친수화 및 iMen 반응을 통해 ePTFE 멤브레인의 구조적 한계를 근본적으로 극복하여 성능 개선 및 장기 내구성이 보장됨을 증명하였다.

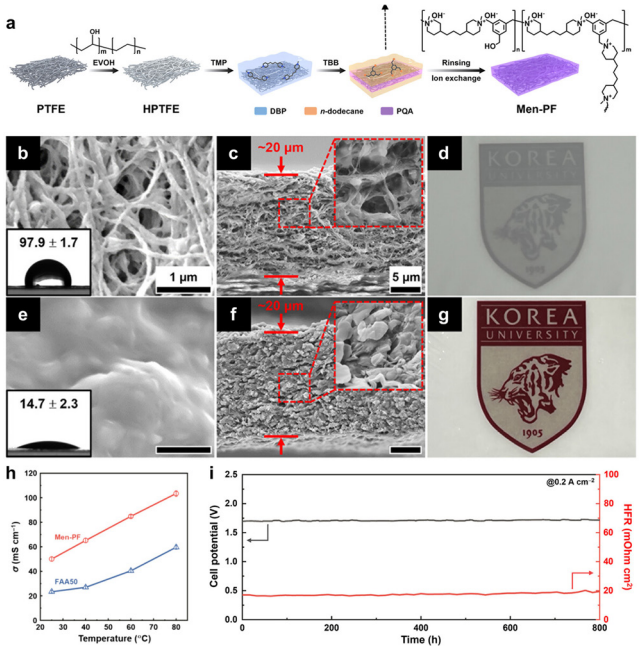


Figure 4. (a) 친수기가 도입된 PTFE 지지체(HPTFE) 및 iMen 반응을 통해 강화복합막(Men-PF)을 제조하는 과정 도식. HPTFE의 (b) 표면 SEM 이미지, (c) 단면 SEM 이미지, (d) 실제 이미지. Men-PF의 (e) 표면 SEM 이미지, (f) 단면 SEM 이미지, (g) 실제 이미지. (h) Men-PF와 상용막의 온도별 이온전도도, (i) 0.2 A cm^{-2}에서 Men-PF의 셀 전위와 고주파 저항을 포함한 장기 내구성 평가[6].

나노섬유형 PTFE가 이오노머의 팽윤 및 기체 크로스오버를 효과적으로 억제함을 실험적으로 증명하였다(*Figure* 5f).

이 밖에도 한국생산기술연구원, 서울대학교 공동연구팀은 유화 전기방사(emulsification electrospinning)라는 독특한 공정을 활용하여 PTFE의 불용성과 상용 ePTFE 멤브레인의 조밀한 기공 구조 문제를 해결한 PTFE 나노섬유(nanofiber) 기반 AEM 강화복합막 기술을 소개하였다(*Figure* 5a)[7]. *Figure* 6b와 같이 PTFE 나노섬유는 77%의 높은 기공도를 나타냈으며, 이를 기반으로 구현된 FAA 이오노머(Fumion, FUMATECH BWT GmbH) 기반의 강화복합막은 이오노머가 완전히 침투된 치밀한 구조를 보였다(*Figure* 5c,d). 게다가 막의 이온전도도는 단일 이오노머막(71.7 mS cm^{-1}) 대비 97.6% 수준(70.0 mS cm^{-1})으로 유지되면서도 기계적 강도와 치수 안정성은 대폭 향상된 것으로 관찰되었다(*Figure* 5e). 장기 운전 테스트에서는 1000 시간 이상 작동되었음에도 구조적 손상이 확인되지 않은 점으로 미루어보아 나노섬유형 PTFE가 이오노머의 팽윤 및 기체 크로스오버를 효과적으로 억제함을 실험적으로 증명하였다(*Figure* 5f).

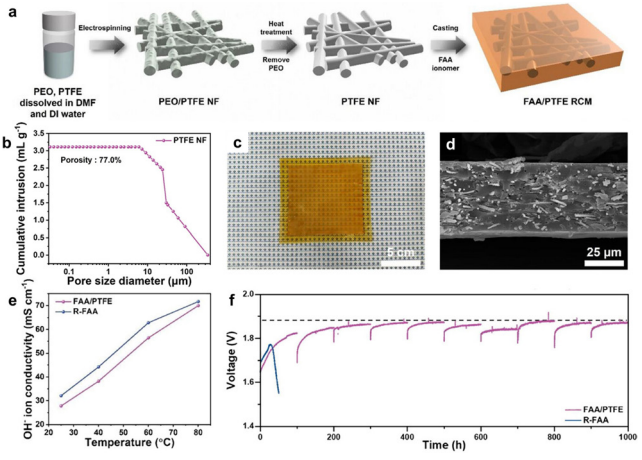


Figure 5. (a) PTFE 나노섬유 제작 및 FAA/PTFE 강화복합막의 제작 과정 도식. (b) PTFE NF의 기공도. FAA/PTFE 강화복합막의 (c) 실제 이미지 및 (d) SEM 단면 이미지. FAA/PTFE 강화복합막과 단일 이오노머막의 (e) 온도별 이온 전도도 및 (f) 500 mA cm^{-2}에서의 장기 내구성 측정 결과[7].

2.4. 국내외 산업기술 동향

PEM 수전해 시장은 연평균 7.5%의 성장률을 보이며, 2025년 83억 7천만 달러에서 2035년 172억 5천만 달러 규모의 시장을 형

성할 것으로 전망된다. 유럽과 북미 시장을 중심으로 기후 위기 대응과 에너지 전환이라는 공동 목표 아래, PEM 수전해 기술을 핵심 솔루션으로 채택 및 상용화하고 있는 추세이다[8]. PEM 수전해는 높은 기술성숙도로 상용화 중심의 투자가 집중되고, 일부 자사의 기술력이 적용된 분리막을 앞세운 기업이 시장을 주도하고 있다[9]. 해외에서는 Siemens Energy(Silyzer 300), ITM Power(POSEIDON), Plug Power(EX-4250D), Cummins(HyLYZER 4000-30) 등의 기업들이 수 MW급 단일 스택의 모듈화를 통해 실증 테스트를 진행하고 있으며, 부대설비(balance of plant, BOP)를 포함한 통합 수전해 장치의 기술력을 확보하기 위한 위치 선점에 나서고 있다. 국내에서는 대표적으로 Elchemtech이 MEA의 원천 기술을 보유하고 있으며, 1 MW 급 단일 스택을 개발하여 시험 평가를 진행한 바 있다(*Figure* 6a).

AEM 수전해 시장은 연평균 24%의 성장률을 보이며, 2023년 약 12억 달러에서 2032년 85억 달러 규모의 시장을 형성할 것으로 전망된다. 친환경 수소에 대한 수요가 증가함에 따라, 수소 생산 기술의 경제적 타당성과 확장성을 확보하는 데 있어 첨단 분리막(복합 및 하이브리드 타입)의 역할이 더욱 중요해지고 있다. 최근 중국, 일본, 한국 등 아시아 주요 국가들이 수소 인프라 개발 및 재생에너지 프로젝트에 막대한 투자와 정책적 지원을 하는 것은 해당 분야의 상당한 성장 잠재력을 시사한다[10]. AEM 수전해는 기술 상용화가 시도되고 있으나 아직까지 보고된 큰 성공을 거둔 사례는 없다. 해외에서는 대표적으로 Enapter(EL 4.0)의 0.0024 MW급 단일 스택의 제품이 공급되고 있으며, 국내에서는 아직 상용화 단계는 아니지만 한화솔루션이 0.25 kW 급 모듈을 2023년 H2 MEET 행사장에서 공개한 바 있다(*Figure* 6b). AEM 수전해 기술은 PEM 수전해의 단점을 보완한 차세대 기술인만큼 아직은 높은 기술성숙도의 상용 제품을 위한 지속적인 개발이 요구된다.

Figure 6. (a) Elchemtech 사의 PEM 수전해 설비 및 (b) 한화솔루션의 AEM 수전해 스택의 이미지.

분리막 기술은 그린수소 생산과 경쟁력 강화를 위한 핵심 소재로, 국내외 기업과 연구기관이 기술개발과 상용화에 박차를 가하고 있다. Chemours, Gore, AGC 등 시장을 선도하는 소재 공급업체들은 다층 구조 또는 복합소재를 활용한 강화막을 개발하고 있고, 막 강화를 통해 시트 두께를 5~10 μm 수준으로 얇게 만들 수 있다. 한편, PFAS 기반 멤브레인 대한 규제 위협이 증가함에 따라 수전해 시장에서도 이를 대체하는 탄화수소계 분리막의 수요가 증가하고 있다[11].

미국의 Chemours는 최근 미국에너지부(United States Department of Energy, DOE) 지원으로 기존 Nafion™을 대체하는 PEM 수전해용 고내구성의 저저항 멤브레인을 개발할 예정이며, 이는 차세대 기술로서 멤브레인의 제조 용이성을 고려하여 대량생산 및 상용화를 목표로 한다고 밝혔다.

국내 기업 코멤텍은 국내 최초로 PEM의 성능과 내구성을 획기적으로 개선한 두께 100 μm 이하의 PTFE 강화복합막을 개발하였고, 이를 적용한 고성능 MEA 개발에도 나섰다. 코오롱인더스트리는 자체적으로 다공성의 박막 지지체의 적층 기술과 이오노머 나노 분산 기술 기반으로 강화복합막형 구조를 가진 전해질막 중에서도 높은 기계적 강성과 치수안정성을 가진 PEM을 개발하였다. 한국화학연구원은 수전해 장치의 성능을 80% 향상하는 가지사슬 구조의 탄화수소계 전해질막 제조 기술을 확보하였으며, 기존 상용막과 비교해 80 °C에서 1.6배 이상 향상된 수소이온 전도도와 기존보다 약 3분의 1 수준의 낮은 수소 기체 투과율을 나타냈다. 앞서 소개하였듯이 한국생산기술연구원에서는 연료전지 및 수전해용 분리막의 내구성 및 기계적 안정성을 향상시키기 위해 PTFE 나노섬유 기반 강화복합 분리막을 개발하였으며, 지지체-이오노머 계면 처리, 연신 및 함침 공정 최적화 등을 포함한 다양한 연구를 진행하고 있다. 이외에도 한국에너지기술연구원은 고성능, 고안정성 수전해 분리막을 개발하고 관련 기술을 기업에 이전하는 등 상용화를 위한 활발한 연구를 진행하고 있다.

AEM 수전해 분리막 기술의 경우, 독일의 Evonik이 DURAION® 개발 및 상용화에 주력하여 현재 2.5 GW 용량 AEM 분리막 생산을 위해 파일럿 설비를 구축 중이다. 또한 일본의 Sumitomo Bakelite는 이온전도도가 높은 PFAS-free 소재 폴리노보넨(polynorbornene, PNB)을 사용한 AEM을 개발하여 현재 양산을 준비 중이다(*Figure* 7).

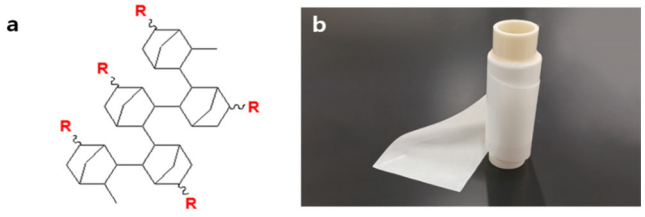


Figure 7. (a) PNB 대표적 구조 및 (b) 개발 AEM 제품 이미지.

이 밖에도 한국화학연구원에서는 고분자량화 폴리카바졸계(polycarbazole) 소재를 통해 기존 상용 소재 대비 20% 이상 향상된 이온전도도와 10배 우수한 내구성을 보이는 새로운 막을 개발하였고, 인천대학교 연구팀은 미세 다공성 폴리머(polymer of intrinsic microporosity, PIM)와 N-메틸 피페리디늄(N-methylpiperidinium)-SEBS를 활용한 교차 결합 폴리머로 AEM을 개발해 이온전도도 및 기계적 특성을 개선하기도 하였다.

이처럼 국내외 여러 연구기관과 기업에서 고내구성·고성능 수전해의 상용화를 목표로 분리막 기술의 혁신을 위한 새로운 소재 및 공정 개발을 동시다발적으로 추진하고 있다.

3. 향후 연구 방향 및 과제

향후 전해질막 연구 관점은 크게 두 갈래로 정리된다. 첫째, 안정성과 내구성이 확보된 고성능 강화복합막의 고도화이다. 이를 달성하기 위해서는 새로운 고기공도 PTFE 지지체의 제조 전략, ePTFE 계면의 친수화, 이온 전도성 지지체 개발 등의 접근 방식을 통해 기존 강화복합막보다 고도화된 치밀한 막의 개발이 요구된다. 둘째, 비불소계로의 전환이다. PFAS 규제와 같은 글로벌 환경 규제가 강화됨에 따라 TFE(tetrafluoroethylene)을 기반으로 하는 PFSA 이오노머 대신 에테르(ether) 결합을 배제한 비불소계 이오노머의 개발이 유력한 대안으로 떠오르고 있다. 동시에 계면 안정화를 위한 폴리올레핀(polyolefin) 계열의 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 및 폴리프로필렌(polypropylene, PP)이 다공성 보강 지지체로서 유력한 후보로 급격하게 부상하고 있으며, 이들의 기술 성숙도 향상을 위해 다방면으로의 연구개발이 필수적이다.

이들 전략을 통해 전해질막의 기능적 내구성과 환경 지속 가능성을 동시에 달성하는 차세대 전해질막의 개발이 수전해 기술뿐 아니라 다양한 산업 분야로 확장될 핵심 방향이 될 것으로 전망한다.

참고문헌

1. IRENA, “Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal”, International Renewable Energy Agency, 2020.
2. D. Li, E. J. Park, W. Zhu, Q. Shi, Y. Zhou, H. Tian, Y. Lin, A. Serov, B. Zulevi, E. D. Baca, C. Fujimoto, H. T. Chung, and Y. S. Kim, “Highly Quaternized Polystyrene Ionomers for High Performance Anion Exchange Membrane Water Electrolysers”, *Nat. Energy*, 2020, **5**, 378-385.
3. J. H. Lee, K. A. Lee, K. W. Kim, S. H. Kim, J. F. Kim, Y. Shin, S. Kim, S.-J. Choi, Y.-E. Sung, and K. R. Yoon, “Overcoming Thickness-Durability Trade-Off in PEM Fuel Cells via Stretched PTFE Nanofiber-Reinforced Composite Membranes” *Adv. Energy Mater.*, 2025, e03151.
4. W. L. Gore & Associates Ltd., New GORE-TEX membrane reflects Bob Gore’s journey, GORE-TEX, www.gore-tex.com/kr/useful-contents/new-goretex-membrane-reflects-Bob-Gore-journey(Accessed Nov. 12, 2025)
5. G. Lee, M. Yuk, B. Noh, D. M. Yu, J. K. Jang, T. H. Kim, and K. J. Lee, “Mechanically toughened PFSA reinforced composite membranes with parylene-coated scaffolds for proton exchange membrane fuel cell and water electrolysis”, *J. Membr. Sci*., 2025, **735**, 124581.
6. H. Kim, S. Jeon, J. Choi, Y. S. Park, S. J. Park, M. S. Lee, Y. Nam, H. Park, M. J. Kim, C. Lee, S. E. An, J. Jung, S. H. Kim, J. F. Kim, H. S. Cho, A. S. Lee, and J. H. Lee, “Interfacially Assembled Anion Exchange Membranes for Water Electrolysis”, *ACS Nano,* 2024, **18**, 32694-32704.
7. K. W. Kim, K. A. Lee, J. H. Lee, S. H. Kim, J. F. Kim, T. H. Kim, S. Kim, Y. E. Sung, and K. R. Yoon, “Membrane Reinforcement Strategy Using Robust Nanofibers for Durable and Safe AEM Water Electrolysis”, *Small*, 2025, e04805.
8. “PEM Water Electrolyzer Market: 2026-2035”, Research Nester.
9. J. Baek, and S. H. Kim, “Current State of Water Electrolysis Technology and Large-scale Demonstration Projects in Korea and Overseas”, *J. Hydrog. New Energy*, 2024, **35**, 14-26.
10. “AEM Water Electrolyzer Market: Global Industry Analysis, Growth, Share, Size, Trends, and Forecast 2025-2033”, DataIntelo.
11. “Ion Exchange Membranes 2025-2035: Technologies, Markets, Forecasts”, IDTechEx.