Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 832~841
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.832

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

고분자 전해질막 수전해 막전극접합체 재활용 연구 동향

손민규†

한국세라믹기술원 AI융합연구단

Research Trends on Recycling of Membrane Electrode Assembly in Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis

MIN-KYU SON†

AI-Convergence R&D Group, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology. 101 Soho-ro, Jinju 52851, Korea

†Corresponding author :
minkyu.son@kicet.re.kr

Received 10 November, 2025
Revised 15 December, 2025
Accepted 18 December, 2025

Abstract >> Membrane electrode assembly (MEA) is a main part in polymer electrolyte membrane water electrolysis (PEMWE). It consists of a polymer electrolyte membrane for transporting protons, hydrogen evolution catalyst in the cathode side, and oxygen evolution catalyst in the anode side. These components are above 70% of the PEMWE stack production cost. Hence, the cost reduction of MEA is important for the commercialization of low-cost PEMWE. Recycling of MEA is an essential technology for achieving this goal. In this work, the recent research trends on recycling of MEA in PEMWE are reviewed focusing on membrane and catalysts. It provides comprehensive insights on the development of novel MEA recycling technology toward a sustainable hydrogen society in the future.

Key words : Polymer electrolyte membrane(고분자 전해질막), Water electrolysis (수전해), Membrane electrode assembly(막전극접합체), Catalyst recycling (촉매 재활용), Membrane recycling(멤브레인 재활용)

1. 서 론

전기를 이용하여 물을 분해하는 수전해(water electrolysis) 기술은 재생 에너지를 통해 생산되는 전기를 활용할 경우, 수소 생산 전 과정에서 CO_2가 전혀 발생하지 않기 때문에, 차세대 그린 수소 생산법으로 각광을 받고 있다. 고분자 전해질막 수전해(polymer electrolyte membrane water electrolysis, PEMWE)는 대표적인 그린 수소 생산법 중 하나로, 에너지 효율이 높고, 고순도의 수소 생산이 가능한 장점을 가지고 있으며, 부하 변동에 따른 응답 속도가 우수하기 때문에 재생 에너지 연계 수전해 시스템으로 가장 적합한 기술로 평가받고 있다[1-3].

하지만 강한 산성 동작 조건에서 내구성을 확보하기 위하여 수소 및 산소 발생 촉매로써 귀금속 촉매가 사용되기 때문에, 제조 단가가 높아 상용화의 걸

림돌이 되고 있다. 일반적으로 수소 발생 촉매로는 Pt, Pd 계열, 산소 발생 촉매로는 Ir, Ru 계열의 귀금속 촉매가 사용된다. 따라서 이러한 걸림돌을 해결하기 위하여, 비귀금속 및 귀금속 저감형 촉매 개발, 효율 향상에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다[4-6].

이러한 노력과 더불어, 사용된 PEMWE 스택에서의 귀금속 촉매 및 고가의 구성품의 재활용도 PEMWE의 제조 단가를 줄일 수 있는 현실적인 방안으로 고려되고 있다. PEMWE 시스템은 아직까지 소규모 실증 프로젝트 중심으로 운영되고 있어, 2023년 기준, 300 MW 규모의 스택이 설치되어 있으나[7], 2030년 이후부터 기하급수적으로 그 설치량이 늘어날 것으로 예상되고 있다[8]. 일반적으로 그리드 연결형 PEMWE은 이론적으로 하루 24시간 연속 운전이 가능하고, Off-grid 타입의 PEMWE은 연결 신재생에너지 시스템에 따라 연간 4,979~8,075시간 운전한다고 보고되어지고 있다[9]. 이를 고려할 때, 현재 PEMWE의 최대 수명이 80,000시간임을 감안하면[1], 약 10~15년 뒤인 2030년대 중후반에서 2040년부터는 사용 연한이 지난 폐스택이 본격적으로 등장할 것으로 예상되므로, PEMWE 재활용은 제조 단가 감소와 시스템 보급화를 선도하는 미래 핵심 기술로 부상할 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 귀금속 촉매를 포함하고 있는 PEMWE의 핵심 부품인 막전극접합체(membrane electrode assembly, MEA)의 재활용 관련 최신 연구동향을 분석하여 아직까지 기초 연구단계에 머물러 있는 PEMWE 재활용 연구의 향후 전략 및 개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 분석 범위

2.1 PEMWE 동작 원리 및 구성 요소

PEMWE는 양성자(H^+)를 전하전달 매개체로 Table 1에서 보여지는 반응을 기반으로 음극(Cathode)과 양극(Anode)에서 수소와 산소를 만들어내는 수전해 시스템이다[10,11]. 따라서, PEMWE은 H^+를 이동시킬 수 있는 고분자 전해질막이 사용되며, 알칼라인 수전해 시스템과 달리 산성 분위기에서 동작한다.

Table 1. Reactions and products of electrodes in PEMWE system

Electrode	Reaction	Product
Cathode	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	H_2
Anode	$H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$	O_2

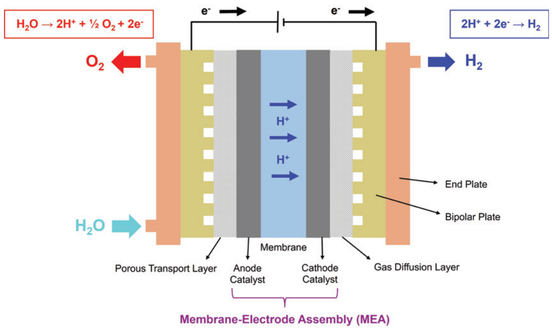

Fig. 1. Components of PEMWE single cell

Fig. 1은 PEMWE 단위셀의 구성도이다. H^+를 이동시킬 수 있는 고분자 멤브레인을 중심으로 음극(cathode)에는 수소 발생 촉매와 양극 (anode)에는 산소 발생을 위한 촉매가 위치한다. 촉매층은 전도성을 띄는 지지체를 포함하며, H^+ 이동을 위한 이오노머(ionomer)를 이용하여 멤브레인과 연결되어 있다. 이렇게 연결된 멤브레인과 촉매를 MEA라고 지칭하며, PEMWE의 주요 반응이 모두 일어나므로 PEMWE의 핵심 부품이라고 할 수 있다.

PEMWE에서는 양극을 통해 물이 공급이 되고 동시에 산소가 발생되기 때문에 기체 및 액체의 수송이 가능한 다공성 확산체(porous transport layer, PTL)이 위치하며, 음극을 통해서는 수소만 발생이 되므로 가스 확산층(gas diffusion layer, GDL)이 위치한다. 그 외곽에는 물분해를 위한 외부 전기 에너지의 및 반응/생성물 공급 역할을 하는 양극판(bipolar plate)와 구성 요소를 결합하는 엔드 플레이트(end plate)로 구성이 되어 있다. 대량의 수소를 만들어내는 스택은 MEA와 양극판으로 구성된 단위셀이 직렬 형태로 연결이 되고 엔드 플레이트가 이를 고정하는

형태로 되어 있다.

2.2 재활용 연구 동향 분석 범위

Fig. 2는 최근 발표된 NREL 보고서를 바탕으로 PEMWE 생산 규모에 따른 PEMWE 스택 구성 요소별 제작 비용을 분석한 결과이다[12]. 분석 결과, 생산 규모가 커짐에 따라, 전체적인 비용의 절감이 이루어지는 것을 알 수 있으나, 전체적인 비용 절감이 이루어져도 음극 및 양극 촉매, 멤브레인이 전체 제작 비용의 70% 이상을 차지하고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상은 첫 번째로, 음극 및 양극 촉매가 Pt(음극) 및 Ir(양극) 기반의 귀금속 촉매가 사용되고 있기 때문이다. 특히, 해당 귀금속은 지리적 이슈로 공급이 한정적인데 반해, 수요가 급등하고 있어 PEMWE 가격 절감을 위해서 우선적으로 고려되어야 하는 구성 요소이다. 두 번째로, 멤브레인의 경우, 현재 PEMWE에서 가장 많이 사용되는 멤브레인은 과불화화합물(perfluorosulfonic acid, PFSA) 기반의 Nafion막으로 제작 비용적인 측면 뿐만이 아니라 환경적으로 유해한 물질로 분류가 되고 있어[13], 대체제 개발 및 재활용의 중요성이 대두되고 있다.

전체적으로, 촉매와 멤브레인으로 구성된 MEA가 전체 제작 비용의 70% 이상을 차지하는 것을 고려할 때, 이를 효과적으로 재활용할 수 있다면, PEMWE의 가격 절감에 크게 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 PEMWE MEA의 재활용을 중심으로 최신 연구 동향을 고찰하고자 한다. 이를 위해, PEMWE 뿐만이 아니라, 구성 요소가 비슷한 고분자 전해질막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)의 MEA 재활용 연구 동향을 포함한 MEA 재활용 최신 연구 동향을 분석하고자 한다.

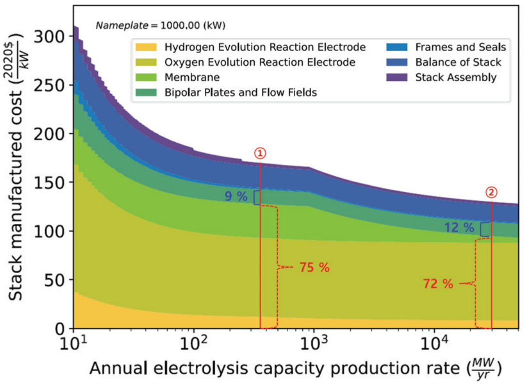

Fig. 2. PEMWE stack manufactured costs at various production rates. Redrawn with permission from [12]

3. PEMWE MEA 재활용 연구 동향

3.1 촉매와 멤브레인 분리

MEA에서 촉매와 멤브레인을 재활용하기 위해서는 각각의 특성을 유지하면서 촉매와 멤브레인을 분리할 수 있는 공정이 필요하다. Xu 등[14]은 농축된 황산(H_2SO_4)에 MEA를 담구어 Nafion 멤브레인을 녹여 촉매와 멤브레인을 분리하였다. 하지만, 해당 공정은 강산을 이용할 뿐만 아니라, 산성 가스인 이산화황(sulfur dioxide, SO_2)가 발생되어 환경적으로 친화적인 공정이 아니다.

이러한 공정을 대체하기 위해서 최근에는 알코올과 물 혼합물을 이용한 분리 공정을 개발하여 사용하고 있다. 해당 공정은 멤브레인의 부풀림(swelling)으로 인해 촉매가 멤브레인으로부터 떨어져 나가므로, 강산으로 멤브레인을 녹이는 방법과 달리 친환경적이다. Robert 등[15]은 알코올의 종류, 알코올과 물의 배합 비율, 온도 변화 등의 조건을 변화하여 촉매와 멤브레인 분리 최적 조건을 도출하였다. 그 결과, 아이소프로필 알코올(isopropyl alcohol, IPA)과 물을 1:1(IPA vol 50%)로 배합한 경우, 촉매가 멤브레인에서 효과적으로 분리가 되었다. 온도가 높아질 경우, 촉매 탈락 속도가 빨라지나, 75℃ 이상이 되면 멤브레인이 녹아버리게 되어 멤브레인 재활용에 문제가 생기게 된다.

이와 동시에 초음파 처리(ultrasonication)나 산의 추가는 멤브레인과 촉매의 분리에 도움을 줄 수 있다. 초음파 처리는 멤브레인과 촉매의 결합을 약화시켜 분리를 가속화 시킬 수는 있지만, 멤브레인과 이

오노머의 폴리머 체인을 파괴하기 때문에[16] 멤브레인 재활용에 적합하지 않다. 또한, 산의 추가는 카본 계열 촉매 지지체의 부식을 야기하여 촉매를 분리시키지만, 멤브레인의 형상을 변화시킬 수 있다. 질산(HNO_3)이 멤브레인의 형상을 일으키지 않지만[15], 앞서 말한 것과 같이 산의 사용은 환경적 이슈를 피하기 어렵다.

Carmo 등[17]은 위와 같은 이슈를 피할 수 있는 대체 공정으로써, 용액 순환 촉매 분리 공정을 제안하였다. IPA와 물 혼합물을 MEA의 음극 및 양극 측을 통해서 펌프로 순환시켜 촉매를 분리시켜, 95% 이상의 촉매 회수율(Pt : 96.8%, Ir : 97.9%)을 보였다. 또한, 촉매가 떨어진 멤브레인을 재활용해 PEMWE의 MEA를 제작하여 성능을 평가하는데 성공하였다. 해당 공정은 빠른 시간 내에 촉매를 멤브레인으로부터 분리할 수 있어 재활용 공정의 효율화와 멤브레인의 재활용성을 극대화할 수 있는 장점을 가지고 있는 분리 기술이라고 할 수 있다.

3.2 촉매 재활용

일반적으로 사용한 귀금속 촉매를 회수 및 재활용을 하는 방법은 크게 건식 야금법(pyrometallurgical method)과 습식 야금법(hydrometallurgical method)으로 나뉘어진다. 건식 야금법은 고온에서 사용된 MEA를 태워 남은 부산물을 이용하여 촉매를 회수하는 방법이다[18]. 해당 공정은 간단하지만, 에너지가 많이 드는 공정이며, PFSA 기반 멤브레인이 탈 경우, 유독 가스인 플루오린화 수소(hydrogen fluoride, HF) 뿐만이 아니라, 산성 가스인 이산화황(sulfur dioxide, SO_2)가 발생되어 환경적으로 선호되지 않는 방법이다[19]. 따라서, 현재 대부분의 촉매 재활용 연구는 저온 공정이며, 우수한 회수율을 보이는 습식 야금법을 중심으로 개발되고 있는 실정이다.

습식 야금법을 통한 귀금속 촉매의 회수는 침출(leaching) 공정을 기반으로 한다. 일반적으로는 귀금속 촉매를 녹이기 위해 강산인 왕수(aqua regia)를 사용하여 왔으나 환경적 이슈로 인하여 최근에는 염산(HCl)에 추가적인 산화제로 과산화수소(H_2O_2)를 섞은 용액을 침출 공정에 사용하고 있다[20,21]. 이렇게 침출된 용액에 용매 추출 및 침전 공정을 추가함으로써 귀금속 촉매를 재회수할 수 있다.

Sharma 등[20]은 PEMFC의 MEA을 1M HCl과 1.5 vol% H_2O_2 용액에 담궈 PtRu/C 촉매를 침출시킨 후, 수산화나트륨(NaOH) 용액을 추가하여 pH 조절을 통하여 Ru 수산화물 형태로 침전시켜 Ru 촉매를 97% 회수하였다. 그 후, 남은 용액에 탄소를 첨가하여 환류(reflux)시킴으로써, Pt/C를 재제작하여 Pt 촉매를 회수하였다. 재제작된 Pt/C는 넓은 표면적으로 인해 상용 Pt/C 보다 촉매 성능은 우수하였으나 탄소 부식으로 인해 안정성은 좋지 않았다.

Sandig-Predzymirska 등[21]은 HCl과 H_2O_2 혼합 용액에 1.5M $AlCl_3 \cdot 6H_2O$를 첨가를 통해 추가적인 염화물(chloride) 이온을 제공하여 약산의 분위기에서 촉매를 침출시켰다. 이후 $Na_2S_2O_8$ 용액을 추가한 휘발(volatilization) 공정을 통해 Ru 촉매를 82% 회수하고, NH_4Cl 용액을 추가한 침전(precipitation) 공정을 통해 Pt 촉매를 90% 회수하였다. 회수된 Pt 및 Ru

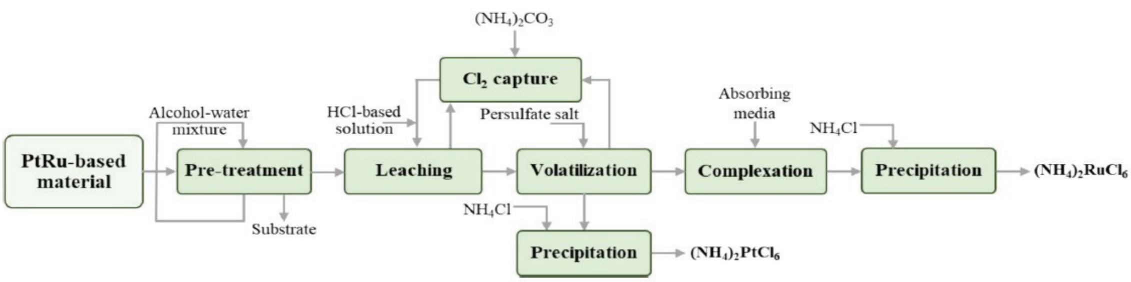

Fig. 3. Hydrometallurgical method for recycling PtRu based catalyst with the Cl_2 capture process. Printed with permission from [21]

촉매는 $(NH_4)_2PtCl_6$ 및 $(NH_4)_2RuCl_6$의 salt 형태로 재사용하여 상용품과 거의 동일한 특성을 보였다. 해당 공정은 Fig. 3과 같이 HCl과 H_2O_2가 반응하여 발생하는 염소 가스(Cl_2)를 탄산암모늄($(NH_4)_2CO_3$) 용액을 이용하여 잡아내어 침출 공정에 재활용할 수 있기 때문에 지속가능한 친환경 공정이라고 할 수 있다.

위와 같이 일반적인 침출 공정은 산을 기반으로 하기 때문에 환경 및 독성 이슈로 사용이 제한되고 있어 이를 대체하기 위한 친환경 용매(green solvent)도 연구 중에 있다. 이온성 액체(ionic liquid, IL)는 낮은 휘발성과 쉬운 재활용성으로 유력한 후보 중에 하나이다. Lim 등[22]은 1-Benzyl-3-methylimidazolium Bis(trifluoromethylsulfonyl)imide를 이용하여 90% 이상의 Pt를, Trioctylmethylammonium chloride를 이용하여 70% 이상의 Pd를 침출하는데 성공하였다. 또한, Pianowska 등[23]은 Cyphos IL 101을 톨루엔과 혼합하여 높은 침출율(Pt 99.95%, Pd 99.97%)을 가지는 침출 공정을 개발하였다. 하지만, 일부 이온성 액체는 높은 독성을 가지고 있을 뿐만 아니라, 높은 점도로 인해 귀금속 분리 및 침출이 어려운 단점이 있다.

공융 용매(deep eutetic solvent, DES)는 IL보다 경제적이며 친환경적이라는 장점이 있으며[24], 친수성 DES의 경우, 금속 추출에 적합하다고 알려져 있다[25]. 하지만, 이 또한 IL과 마찬가지로 높은 점도로 인해 침출이 어려운 단점을 보유하고 있다. 초임계 이산화탄소(supercritical CO_2, $ScCO_2$)는 IL 및 DES가 가진 단점을 극복할 수 있는 대안이지만[26], 고가의 공정과 부수의 침전물이 생길 수 있는 가능성이 존재하여[27] 침출 공정 적용시 이를 고려해야 한다.

최근에는 습식 야금법을 대체하기 위한 차세대 촉매 회수 공정이 많이 연구되고 있으며, 전기화학적 용해(electrochemical dissolution)도 그 중 하나이다[28,29]. 전기화학적 용해는 전위에 따른 산화/환원 반응을 이용해 귀금속을 회수하는 공정으로 습식 야금법과 달리 산화제를 사용하지 않으며, 산의 이용도 적은 친환경 공정이다. 하지만, 전위를 걸어주기 때문에 전기전도성이 충분히 확보되어야 하므로, 이를 적용하기 위해서는 폐MEA의 전기전도성 확보가 매우 중요하다.

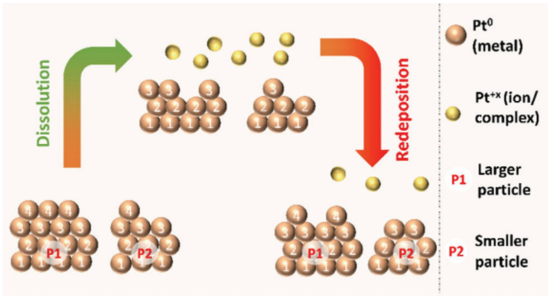

Fig. 4. Ostwald ripening effect of Pt nanoparticles (Pt dissoution and redeposition process. Printed with permission from [29]

또한, Pt 기반 촉매의 경우, Fig. 4와 같이 용해 과정에서 작은 촉매 입자가 뭉쳐 큰 입자로 재응집되는 Ostwald ripening 현상이 일어날 수 있기 때문에[29], 재활용 촉매의 품질이 떨어질 수 있다. 따라서, 이러한 문제를 개선하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. Chourashiya 등[30]은 염화물 이온을 추가하여 녹여진 Pt 이온을 안정화시킴으로써, 이 현상을 최소화하였다. Guillet 등[31]은 Pt 용해 과정 중 Pt 환원 전위를 조절함으로써, 이 현상을 개선하였다. 일반적인 Pt 용해 과정에서는 Pt 환원 전위에서 PtO_x 환원을 통한 Pt 생성과 Pt 재응집이 경쟁적인 반응으로 일어난다. 하지만, 해당 연구에서는 전통적으로 사용되는 Pt 환원 전위 0.4 V (vs RHE)보다 상향된 0.85 V (vs RHE)를 환원 전위로 사용함으로써, Pt의 재응집 현상을 억제하고 PtO_x 환원 반응을 통한 Pt 생성을 강화하여, 균일한 크기의 고품질의 Pt 나노 입자를 회수하였다.

한편, MEA내에는 촉매 뿐만이 아니라 전도성 지지체 및 H^+ 이동을 위한 이오노머가 섞여 있기 때문에, 폐MEA에서의 촉매의 효율적인 재활용을 위해서는 이를 고려하여야 한다. 일반적으로 음극의 전도성 지지체로 사용되는 카본블랙은 촉매를 녹인 용액에 상용 카본블랙을 추가하여 Pt/C 촉매로 재활용 한다. Sharma 등[20]은 Pt가 침출된 용액에 탄소를 첨가하여 환류(reflux)시킴으로써, Pt/C를 재제작하였다. Zagoraiou 등[32]은 Pt가 침출된 용액에 상용 카본블랙과 수소화붕소 나트륨(sodium borohydride)을 환원제로 사용

하여 상용 Pt/C 촉매와 유사한 표면적과 활성을 가지는 촉매를 제작하는데 성공하였다. 한편, 음극보다 가혹한 조건에서 동작하는 양극의 경우, 산화물 계열의 전도성 지지체가 사용된다[33]. 최근에 IrO_2기반 양극의 전도성 지지체인 ATO (antimony tin oxide)으로부터 이온 교환법(ion exchange method)로 Sb를 분리한 연구 결과가 있지만[34], 음극처럼 정형화된 전도성 지지체가 없다보니, 음극의 경우보다 연구가 많이 진행되지 않았다.

이오노머는 촉매 재활용 공정에서 대부분 제거가 되나, 이는 재활용 공정을 복잡하게 만드는 원인이 된다. Lee 등[35]은 양극 PTL에 Ir 촉매를 스퍼터링법으로 직접 도포한 이오노머 프리(ionomer-free) PTL을 개발하여 이를 멤브레인과 결합한 MEA를 제작하였다. 해당 기술은 MEA 제작시, 이오노머 뿐만이 아니라 전도성 지지체도 사용이 되지 않으므로, 폐MEA내 촉매 재활용시 전도성 지지체 및 이오노머 영향을 고려하지 않을 수 있다. 따라서, MEA 촉매 재활용 공정을 간략화 할 수 있는 신기술로 평가를 받고 있다.

3.3 멤브레인 재활용

멤브레인 재활용은 초기에는 멤브레인을 녹여 재제막(re-casting)[36]하여 사용하는데 집중되어 있었다. Xu 등[14]은 황산에 150°C 열을 가하여 멤브레인을 녹인 후 제재막을 하여 PEMFC MEA 제작에 재활용하였다. 그 결과, 상용 멤브레인과 거의 유사한 성능을 보였으나, 일부 낮은 성능을 보였다. 이는, 재활용 멤브레인에서 PEMFC 동작 중, 플루오린화물(fluoride)이 방출되어 H^+ 이동도가 저하되었기 때문이다.

강산의 사용을 줄이기 위하여, Xu 등[37]은 IPA와 물을 혼합한 용액에 열을 가하여 끓임으로써 촉매와 멤브레인을 분리하고, 멤브레인을 다이메틸 설폭사이드(dimethyl sulfoxide, DMSO)에 녹여 제재막하여 재활용하였다. 재활용 멤브레인은 상용 멤브레인과 비슷한 기계적 강도와 이온교환능(ion exchange capacity)를 보였다.

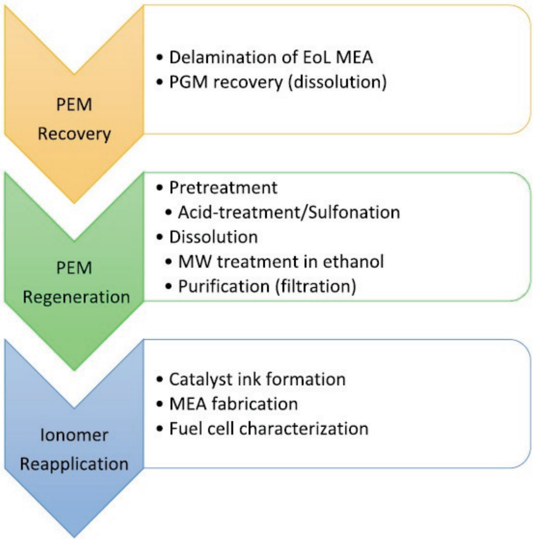

Fig. 5. Process for recycling of PFSA based membrane. Printed with permission from [39]

이처럼, 멤브레인을 녹여 재제막하는 멤브레인 재활용 공정은 강산을 이용하거나 고온의 조건에서 이루어지기 때문에 환경적 측면이나 산업적 응용이 제한적이다. 또한 촉매 및 촉매 지지층인 카본이 나노파티클 형태로 멤브레인 내에 불순물로 남을 수 있어 H^+ 이동 성능에 영향을 줄 수 있는 단점이 있다.

최근에는 폐MEA에서 촉매를 떨어뜨린 후 멤브레인을 그대로 사용하는 방안으로 관심이 옮겨가고 있다. Sreeraj 등[38]은 PEMFC의 폐MEA를 IPA에 수회 담구어 멤브레인과 촉매를 분리한 뒤, 재활용 멤브레인의 특성을 분석하였다. 그 결과, 무수물(anhydride) 형성에 따라 결정성이 강화되어 멤브레인의 기계적 강도가 강해졌다. 하지만, 수분 흡수율(water uptake) 및 H^+ 전도도는 낮아져 PEMFC 성능이 떨어지는 문제점을 보였다.

이러한 재활용 멤브레인의 성능 저하는 추가적인 공정을 통해 향상시킬 수 있다. Sharma 등[39]은 재활용 멤브레인의 성능을 향상시키기 위하여 산처리(acid treatment) 및 술폰화(sulfonation)를 Fig 5와 같이 재활용 전 공정으로 추가를 하였다. 산처리의 경우, 멤브레인 내 황(sulfur) 함유율이 떨어지는 경향을 보였으나, 술폰화의 경우 멤브레인 내 황 함유율

을 유지하면서 H^+ 전도도가 회복되는 경향을 보였다. 반면, 안정성 측면에서는 술폰화 공정이 추가될 경우 촉매의 용해를 야기하므로 좋지 않은 경향을 보였다. 하지만, 해당 멤브레인 재활용 기술은 재제막 공정을 생략할 수 있기 때문에, 멤브레인 재활용 공정을 단순화할 수 있는 유망한 전략으로 평가 받고 있다.

4. 결 론

PEMWE의 MEA는 PEMWE의 동작의 핵심 요소로, PEMWE 제작 비용의 70% 이상을 차지하고 있어 시스템의 가격 절감은 물론 미래의 해당 소재의 공급망 이슈를 고려할 때, PEMWE의 폐MEA의 재활용은 미래 수소 산업의 필수불가결한 분야이다. 하지만, 아직까지 PEMFC MEA 재활용 연구가 대부분으로 기초 연구에 머물러 있는 실정이다. 따라서, 해당 기술의 경쟁력 확보 및 관련 시장 선점을 위해서는 집중적인 연구가 필요한 상황이며, 기술 동향 분석을 바탕으로 할 때 다음과 같은 이슈를 고려하여 연구 방향을 설정하여야 할 것으로 판단된다.

1) PEMFC는 음극 및 양극 촉매가 Pt/C로 동일하나, PEMWE는 음극 촉매는 Pt 계열, 양극 촉매는 Ir, Ru 계열로 종류가 다르다. 따라서, 이를 효과적으로 구분하여 멤브레인에서 분리하는 공정 또는 침출 공정 개발이 필요하다. 또한, Pt 및 Ru 계열 촉매 회수 및 재활용 연구는 많이 이루어지고 있으나, Ir 계열 촉매 회수 및 재활용 연구는 많이 이루어지지 않아 이에 대한 집중적인 연구가 필요하다.
2) 기존의 촉매 재활용 공정은 환경 및 독성 이슈가 존재하기 때문에 이를 대체할 수 있는 친환경 재활용 공정이 필요하다. 습식 야금법에서 친환경 용매 사용, 바이오리칭(bioleaching)[40]과 같은 새로운 친환경 공정 개발 등이 이러한 방향의 연구가 될 수 있으나, 아직까지 PEMWE MEA 재활용에 적용 되지 않고 있을 뿐만 아니라 회수 효율, 반응 시간, 공정 환경 등 고려해야 할 사항이 많으므로 이를 최적화하는 연구에 집중해야 할 것이다.
3) 멤브레인 재활용은 재제막보다는 폐MEA에서 촉매만 분리 후 재사용하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 하지만, 아직까지 재활용된 멤브레인이 우수한 H^+ 이동도와 안정성을 모두 가지는 경우가 없으므로, 두 가지를 동시에 확보할 수 있는 재활용 공정이 개발되어야 한다.
4) 기존의 PEMWE의 멤브레인은 PFSA 기반의 Nafion막이 대부분이며 재활용 또한 여기에 초점이 맞추어져 있었다. 하지만, 최신 멤브레인은 PFSA 기반 멤브레인을 대체하기 위한 탄화수소계 멤브레인[41], 안정성 확보를 위해 세륨(cerium)과 같은 라디칼 스캐빈져(radical scavenger)가 포함된 멤브레인[42] 등이 개발되고 있으므로 미래에는 이를 재활용하는 공정 개발도 필요할 것으로 예상된다.
5) 재활용 공정 적용이 가능한 MEA 디자인 설계 역시 재활용 공정 단순화를 위해 필요할 것으로 보인다. 용해 또는 부착 가능한 바인더 또는 이오노머를 사용하거나, 이오노머 및 전도성 지지체가 없는 MEA 구조 설계 등이 이러한 연구의 해답이 될 수 있을 것이다.
6) 아울러, MEA와 별개로 고내식성 Ti 기반 양극판 역시 부식 방지를 위한 귀금속 Pt 코팅 및 높은 가공 비용으로 인해 PEMWE 스택 제작 비용의 10% 정도 차지하는데 반해(Fig. 2), 양극판 재활용에 관한 연구는 아직까지 기초 단계에 머물러 있다. 현재는 사용된 양극판으로부터 왕수를 이용하여 Ti를 침출하는 연구[34] 정도만 보고되고 있는 실정이기 때문에, 미래에는 재활용성이 좋은 카본 계열 소재 기반 양극판[43]을 사용하거나, 양극판 맞춤형 Pt 코팅 재활용 공정을 개발하는 등 다양한 전략의 양극판 재활용 연구도 필요할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 “한국세라믹기술원 출연사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과임. (과제번호 : 2410013749)

References

1. J. Baek and S. H. Kim “Current status of water electrolysis technology and large-scale demonstration projects in Korea and overseas”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 14-26, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.14
2. M. Lee, D. Yoo, and K. Park “Durability increase of polymer electrolyte membrane water electrolysis by annealing of SPEEK membrane”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 75-82, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.75.
3. Y. M. Seo, T. H. Koo, H. W. Noh, D. W. Ha, and R. K. Ko “Study on continuous durability evaluation and dynamic simulation for PEM water electrolysis system”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 5, 2024, pp. 497-505, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.497.
4. N. Prieto, E. Leal da Silva, J. R. Castiglioni, and A. Cuña, “Synthesis and characterization of non-noble metal cathode electrocatalysts for PEM water electrolysis”, Electrochimica Acta, Vol. 473. 2024, pp. 143474, doi: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143474.
5. B. Tamilarasi, K.P. Jithul, and J. Pandey, “Non-noble metal-based electro-catalyst for the oxygen evolution reaction (OER): towards an active & stable electro-catalyst for PEM water electrolysis”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 58. 2024, pp. 556-582, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.222.
6. Z. Chen, F. Zhang, F. Zhou, H. Liu, X. Duan, and Z. Sun, “Reducing precious metal concentration in PEMWE anodes catalyst layer through synergistic optimization of morphology and structure”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 164. 2025, pp. 150838, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150838.
7. International Energy Agency, “Global Hydrogen Review 2024”, October 2024, Retrieved from https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production.
8. J.C. Koj, P. Zapp, C. Wieland, K. Görner, and W. Kuckshinrichs, “Green hydrogen production by PEM water electrolysis up to the year 2050: Prospective life cycle assessment using learning curves”, J. Ind. Ecol., Vol. 29. 2025, pp. 145-158, doi: https://doi.org/10.1111/jiec.13592.
9. K. Kang, C. Cao, C. Jiang, W. Li, C. Tang, Q. Liu, L. Huang, and C. Wen, “Capacity optimization for minimizing the cost on a hydrogen production system coupling the wind and solar power generation with PEM water electrolysis”, Energy, Vol. 335. 2025, pp. 138076, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138076.
10. Y. Chen, C. Liu, J. Xu, C. Xia, P. Wang, B. Y. Xia, Y. Yan, and X. Wang, “Key components and design strategy for a proton exchange membrane water electrolysis”, Small Structures, Vol. 4. No. 6, 2023, pp. 2200130, doi: https://doi.org/10.1002/sstr.202200130.
11. C. R. Wang, J. M. Stansberry, R. Mukundan, H.-M. J. Chang, D. Kulkarni, A. M. Park, A. B. Plymill, N. M. Firas, C. Pantayatiwong Liu, J. T. Lang, J. K. Lee, N. E. Tolouei, Y. Morimoto, C. H. Wang, G. Zhu, J. Brouwer, P. Atanassov, C. B. Capuano, C. Mittelsteadt, X. Peng, and I. V. Zenyuk, “Proton exchange membrane (PEM) water electrolysis: cell-level considerations for gigawatt-scale deployment”, Chemical Reviews, Vol. 125. No. 3, 2025, pp. 1257-1302, doi: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00904.
12. A. Badgett, J. Brauch, A. Thatte, R. Rubin, C. Skangos, X. Wang, R. Ahluwalia, B. Pivovar, and M. Ruth, “Updated manufactured cost analysis for proton exchange membrane water electrolyzers”, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A20-87625, Retrieved from https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/87625.pdf.
13. A. Abdel-Motagali, S. A. Bacha, W. M. A. E. Rouby, J. Bigarré, and P. Millet, “Evaluating the performance of hybrid proton exchange membrane for PEM water electrolysis”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 49. 2024, pp. 87-102, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.330.
14. F. Xu, S. Mu, and M. Pan, “Recycling of membrane electrode assembly of PEMFC by acid processing”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35. No. 7, 2010, pp. 2976-2979, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.087.
15. M. Robert, F. Dubelley, A. Paul, L. Svecova, and C. Bas, “Investigation of membrane-electrode separation processes for the recycling of ionomer membrane in end-of-life PEM fuel cells”, Energy & Fuels, Vol. 39. No. 5, 2025, pp. 2758-2771, doi: https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c04930.
16. E. Y. Safronova, G. Pourcelly, and A. B. Yaroslavtsev, “The transformation and degradation of Nafion solutions under ultrasonic treatment. The effect on transport andmechanical properties of the resultant membranes”, Polymer Degra-

dation and Stability, Vol. 178. 2020, pp. 109229, doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109229.
17. M. Carmo, G. P. Keeley, D. Holtz, T. Grube, M. Robinius, M. Müller, and D. Stolten, “PEM water electrolysis: Innovative approaches towards catalyst separation, recovery and recycling”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 7, 2019, pp. 3450-3455, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.030.
18. J. Zhao, X. He. J. Tian, C. Wan, and C. Jiang, “Reclaim/recycle of Pt/C catalyst for PEMFC”, Energy Conversion and Management, Vol. 48, No. 2, 2007, pp. 450-453, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.06.020.
19. M. Khalili, H. M. A. Harameen, B. Choi, M. Bae, H. Lee, S. K. Kim, and C. Lee, “Sustainable PGM recovery processes for fuel cell and electrolyzer applications”, ACS Applied Energy Materials, Vol. 8, No. 13, 2025, pp. 8641-8655, doi: https://doi.org/10.1021/acsaem.5c01074.
20. R. Sharma, S. Gyergyek, P. B. Lund, and S. M. Andersen, “Recovery of Pt and Ru from spent low-temperature polymer electrolyte membrane fuel cell electrodes and recycling of Pt by direct redeposition of the dissolved precursor on carbon”, ACS Applied Energy Materials, Vol. 4, No. 7, 2021, pp. 6842-6852, doi: https://doi.org/10.1021/acsaem.1c00964.
21. L. Sandig-Predzymirska, T. V. Barreiros, A. Weigelt, S. Pitscheider, C. M. Pedersen, C. Kallesøe, A. Thiere, M. Stelter, and A. Charitos, “Recovery of platinum and ruthenium from PEM electrodes via hydrometallurgical approach”, Journal of Sustainable Metallurgy, Vol. 11. 2025, pp. 145-159, doi: https://doi.org/10.1007/s40831-025-01011-8.
22 C. R. Lim, J. W. Choi, Y. S. Yun, and C. W. Cho, “Selection of low-toxic and highly efficient ionic liquids for the separation of palladium and platinum in acidic solution, and prediction of the mtal affinity of ionic liquids”, Separation and Purification Technology, Vol. 258, No. 2, 2021, pp. 118019, doi: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118019.
23. K. Pianowska, J. Kluczka, G. Benke, K. Goc, J. Malaraz, and K. Leszczynska-Sejda, “Separation of Pd from Pt and Rh by solvent extraction method from waste solution”, Scientific Reports, Vol. 14, 2024, pp. 17806, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-024-68687-y.
24. B. B. Hansen, S. Spittle, B. Chen, D. Poe, Y. Zhang, J. M. Klein, A. Horton, L. Adhikari, T. Zelovich, B. W. Doherty, B. Gurkan, E. J. Maginn, A. Ragauskas, M. Dadmun, T. A. Zawodzinski, G. A. Baker, M. E. Tuckerman, R. F. Savinell, and J. R. Sangoro, “Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications”, Chemical Reviews, Vol. 121, No. 3, 2021, pp. 1232-1285, doi: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00385.
25. S. Suffia and D. Dutta, “Applications of deep eutectic solvents in metal recovery from E-wastes in a sustainable way”, Journal of Molecular Liquids, Vol. 394. 2024, pp. 123738, doi: https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123738.
26. H. Zheng, Y. Ding, Q. Wen, B. Liu, and S. Zhang, “Separation and purification of platinum group metals from aqueous solution: recent developments and industrial applications”, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 167. 2021, pp. 105417, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105417.
27. A. Preetam, P. R. Jadhao, S. N. Naik, K. K. Pant, and V. Kumar, “Supercritical fluid technology - an eco-friendly approach for resource recovery from e-waste and plastic waste: a review”, Separation and Purification Technology, Vol. 304, 2023, pp. 122314, doi: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122314.
28. R. Sharma, P. Morgen, D. Makovec, S. Gyergyek, and S. M. Andersen, “Enhanced electrochemical dissolution of iridium oxide in acidic electrolytes through presence of metal ions: shortened lifetime and hope for recovery”, RSC Sustainability, Vol. 2, No. 8, 2024, pp. 2225-2238, doi: https://doi.org/10.1039/D4SU00257A.
29. R. Sharma, S. Gyergyek, and S. M. Andersen, “Environmentally and industrially friendly recycling of platinum nanoparticles through electrochemical dissolution-electrodeposition in acidic-free/dilute acidic electrolytes”, Chemistry & sustainability, energy & materials, Vol. 11, No. 21, 2018, pp. 3742-3750, doi: https://doi.org/10.1002/cssc.201801604.
30. M. Chourashiya, R. Sharma, S. Gyergyek, and S. M. Andersen, “Gram-size Pt/C catalyst synthesized using Pt compound directly recovered from an end-of-life PEM fuel cell stack”, Materials Chemistry and Physics, Vol. 276, 2022, pp. 125439, doi: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125439.
31. F. Guillet, M. Chatenet, A. Paul, L. Svecova, and L. Dubau, “Electrochemical recovery of Pt/C electrocatalyst: optimization of the potential range on the leaching process and application to an aged MEA”, Industrial Chemistry & Materials, Vol. 2, No. 1, 2024, pp. 118-131, doi: https://doi.org/10.1039/d3im00085k.
32. E. Zagoraiou, O. Thoda, E. Polyzou, A. M. Moschovi, I. Yakoumis, “Direct reuse of recycled/impure Pt precursor for the production of new electrocatalysts: implementing a sustainable and industrially viable circular hydrogen economy model”, Compounds, Vol. 5, No. 3, 2025, pp. 32, doi: https://doi.org/10.3390/compounds5030032.
33. C. Wang and L. Feng, “Recent advances and perspectives

of Ir-based anode catalysts in PEM water electrolysis", Energy Advances, Vol. 3, No. 1, 2024, pp. 14-29, doi: https://doi.org/10.1039/D3YA00492A.

34. J. Melke, A. Maletzko, E. D. G. Villa, A. Bornet, G. K. H. Wiberg, M. Arenz, L. Sandig-Predzymirska, A. Thiere, A. Charitos, M. Stelter, Z. Wang, S. Pitscheider, E. Bertheussen, C. M. Pedersen, S. Finsdóttir, M. S. Kokborg, D. G. Berman, S. Dalvang, S. S. Müller, F. Seidel, N. Seselj, M. Höglinger, S. Kartusch, J. Eder, M. Macherhammer, A. Trattner, and C. Kallesøe, "Recycalyse - new sustainable and recyclable catalytic materials for proton exchange membrane electrolysers", Chemie Ingenieur Technik, Vol. 96, No. 1-2, 2024, pp. 126-142, doi: https://doi.org/10.1002/cite.202300143.
35. J. K. Lee, G. Anderson, A. W. Tricker, F. Babbe, A. Magdan, D. A. Cullen, J. D. Arregui-Mena, N. Danilovic, R. Mukundan, A. Z. Weber, and X. Peng, "Ionomer-free and recyclable porous-transport electrode for high-performing proton-exchange-membrane water electrolysis", Nature Communications, Vol. 14. 2023, pp. 4592, doi: https://doi.org/10.1038/s41467-023-40375-x.
36. J. A. Moghaddam, M. J. Parnian, and S. Rowshanzamir, "Preparation, characterization, and electrochemical properties investigation of recycled proton exchange membrane for fuel cell applications", Energy, Vol. 161. 2018, pp. 699-709, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.123.
37. H. F. Xu, X. Wang, Z. G. Shao, and I. M. Hsing, "Recycling and regeneration of used perfluorosulfonic membranes for polymer electrolyte fuel cells", Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 32, 2002, pp. 1337-1340, doi: https://doi.org/10.1023/A:1022636000888.
38. P. Sreeraj, R. Vedarajan, N. Rajalakshmi, and V. Ramad esigan, "Screening of recycled membrane with crystallinity as a fundamental property", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 24, 2021, pp. 13020-13028, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.098.
39. R. Sharma, P. Morgen, M. J. Larsen, M. C. Roda-Serrat, P. B. Lund, L. Grahl-Madsen, and S. M. Andersen, "Recovery, regeneration, and reapplication of PFSA polymer from end-of-life PEMFC MEAs", ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 15, No. 41, 2023, pp. 48705-48715, doi: https://doi.org/10.1021/acsami.3c11186.
40. S. Karim, H. M. Saw, and Y. P. Ting, "Evaluation of green chemistry metrics for sustainable recycling of platinum group metals from spent automotive catalysts via bioleaching", Green Chemistry, Vol. 26, No. 7, 2024, pp. 4112-4126, doi: https://doi.org/10.1039/D3GC03918H.
41. C. Klose, T. Saatkamp, A. Münchinger, L. Bohn, G. Titvinidze, M. Breitwieser, K. D. Kreuer, and S. Vierrath, "All-hydrocarbon MEA for PEM water electrolysis combining low hydrogen crossover and high efficiency", Advanced Energy Materials, Vol. 10, No. 14, 2020, pp. 1903995, doi: https://doi.org/10.1002/aenm.201903995.
42. Y. S. Noh, H. Y. Jeong, S. J. Yoon, K. H. Oh, J. Kim, S. So, and D. M. Yu, "Well-dispersed radical scavengers for highly durable hydrocarbon-based proton exchange membranes in water electrolysis", European Polymer Journal, Vol. 216, 2024, pp. 113283, doi: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113283.
43. L. Messing, K. Pellumbi, L. Hoof, N. Imming, S. Wilbers, L. Kopietz, M. Joemann, A. Greve, K. J. Puring, and U. P. Apfel, "Carbon bipolar plates in PEM water electrolysis: bust or must?", Adv. Energy Mater., Vol. 14, No. 40, 2024, pp.2402308, doi: https://doi.org/10.1002/aenm.202402308.