Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 823~831
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.823
JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

PFSA/PBI 복합막을 이용한 철-크롬 레독스 흐름전지의 활물질 투과 저감 연구

이미화[1] · 유동근[1] · 정기영[2,3] · 박권필[4†]

[1]국립순천대학교 신재생에너지평가센터, [2]국립순천대학교 첨단부품소재공학과, [3]국립순천대학교 이차전지연구소, [4]국립순천대학교 화학공학과

Reduction of Electroactive Material Crossover in Iron-Chromium Redox Flow Batteries Using PFSA/PBI Composite Membranes

MIHWA LEE[1], DONGGEUN YOO[1], KEEYOUNG JUNG[2,3], KWONPIL PARK[4†]

[1]Renewable Energy Evaluation Center, Sunchon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea
[2]Department of Advanced Components and Materials Engineering, Sunchon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea
[3]Institute for Battery Research (IBR), Sunchon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea
[4]Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

[†]Corresponding author :
parkkp@scnu.ac.kr

Received 5 December, 2025
Revised 5 December, 2025
Accepted 15 December, 2025

Abstract >> In this study, we evaluated a PFSA/PBI membrane to reduce active material crossover and improve the performance of an iron- chromium redox flow battery (ICRFB). The membrane, which was coated with PBI on expanded PTFE (e-PTFE)-reinforced PFSA, reduced Fe^{2+} and Cr^{3+} crossovers by approximately 1/20 and 1/5, respectively, compared to conventional Nafion 211, and also reduced the increase in crossover with increasing electrolyte cycling speed. It maintained structural and chemical stability even after immersion in 3 M HCl for 7 days. It was confirmed that the PFSA/PBI membrane can simultaneously improve the performance and durability of an ICRFB.

Key words : RFB(산화환원흐름전지), ICRFB(철/크롬 산화환원흐름전지), crossover (투과), PFSA/PBI(과불화술폰산 폴리벤즈이미다졸 복합), Electroactive material(활물질)

1. 서 론

최근 이산화탄소 저감 의무가 강화되면서 태양광과 풍력발전을 중심으로 한 신재생에너지의 보급이 빠르게 확대되고 있다. 그러나 대규모 태양광 및 풍력발전 시스템은 기상 변화에 따라 출력 변동성이 크기 때문에, 전력 안정화를 위한 대용량 에너지저장장치(Energy storage system, ESS)가 필수적이다. 현재 사용 가능한 대용량 2차 전지로는 납축전지, NaS 전지, 그리고 레독스 흐름 전지(Redox Flow Battery, RFB)가 대표적이다.

납축전지는 낮은 에너지 밀도와 짧은 수명, 납 사

용으로 인한 환경적 문제를 가지고 있으며, NaS 전지는 300°C 이상의 고온에서 작동해야 하고 운전비용이 높은 단점이 있다. 반면, RFB는 상온에서 안전하게 운전할 수 있고, 시스템 확장이 용이하며 초기 설치비용이 비교적 낮아 대용량 에너지 저장 기술로서 큰 주목을 받고 있다[1].

RFB는 두 종류의 활물질(electroactive materials)의 산화·환원 반응을 통해 충·방전을 수행하며 에너지를 저장하는 전기화학적 시스템이다. 기본 구성 요소는 두 전해질(활물질), 저장 탱크, 전해질을 순환시키는 펌프, 이온교환막, 그리고 양극(anode)·음극(cathode)으로 이루어진 셀로 구성된다. 전해질로는 V, Br, Fe, Cr, Zn, Ti 등의 금속 이온을 강산 수용액에 용해하여 사용한다[1].

RFB용 분리막은 두 전해질의 혼합을 방지함과 동시에 이온 선택적 전도를 제공하는 핵심 부품이다. 따라서 높은 이온전도도, 낮은 수분흡수(water uptake), 우수한 화학적 및 열적 안정성이 요구된다[2]. 이러한 특성들은 RFB 시스템의 성능과 경제성에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 막은 RFB 기술의 발전을 좌우하는 매우 중요한 요소이다.

대표적인 레독스 흐름 전지는 바나듐 RFB (VRFB)이지만, 전해질 비용이 전체 시스템 비용의 약 53%를 차지하여 경제성 측면에서 한계가 있다[3]. 이에 비해 철과 크롬은 지구상에 풍부하고 가격이 저렴하여, 이를 활물질로 사용하는 철–크롬 RFB (Iron–Chrome Redox Flow Battery, ICRFB)가 대안으로 주목받고 있다[4]. ICRFB는 전해질 비용이 약 9% 수준으로 낮아 경제적 이점이 크며[3,5-10], 양극과 음극에서의 반응식은 다음과 같다[5].

$$\text{양극}: Fe^{3+} + e^- \leftrightarrow Fe^{2+}, E^0 = +0.77\,V\ vs\ SHE \quad (1)$$

$$\text{음극}: Cr^{2+} \leftrightarrow Cr^{3+} + e^-, E^0 = -0.41\,V\ vs\ SHE \quad (2)$$

ICRFB는 VRFB와 비교했을 때 높은 전류밀도에서 유사한 에너지 효율을 확보할 수 있다는 장점이 있으나[5], 상대적으로 더 빠른 용량감소를 보이는 단점이 보고되어 있다[9]. 이러한 성능 저하에는 전극의 영향이 크지만, 고분자 분리막의 특성 역시 중요한 역할을 하며, 고분자 막을 통한 철-크롬이온의 높은 투과도 역시 중요한 원인 중 하나로 지적되고 있다[11]. 높은 이온 투과도의 근본적인 이유는 양쪽 전극에서 활물질의 소비 속도가 빠르기 때문에 막을 경계로 큰 농도 구배(concentration gradient)가 형성되기 때문이다[5].

막은 RFB의 성능과 경제성을 좌우하는 중요한 요소다. 지금까지 Nafion 계통의 불소계 이온교환막이 많이 사용되었는데 고가여서 이를 대체할 막 개발이 활발히 진행되고 있다. 불소계를 대신할 탄화수소계 이온교환막으로 poly (diallyl-bisphenol ether ether ketone)[12], Diels Alder poly (phenylene)s[13], Chlorosulfonated polyethylene[14], Polyethyl ene/poly (4-vinylbenzyl chloride) (PE/VBC)[15], Vinylbenzyl chloride- co-styrene- co-hydroxy ethylacrylate[16], Poly (arylene ether sulfone)[17], Poly (phthalazinone ether ketone ketone)[18,19]이 연구되었다. 본 연구에는 아직 적용 사례가 많지 않은 불소계 막(Perfluorosulfonic Acid, PFSA)에 탄화수소계인 PBI (Polybenzimidazole)를 코팅한 막 PFSA/PBI 막을 도입하여 활물질(Fe, Cr) 투과도를 감소시켜 ICRFB의 성능 및 경제성을 향상시킬 수 있는지 검토하였다.

2. 실 험

철-크롬 RFB (Iron-Chrome Redox Flow Battery, ICRFB) 단위전지는 전극으로 카본 펠트, 이온교환막, graphite plate, 집전판, 알루미늄 end plate로 구성하였다. 이온교환막은 불소계막인 Nafion 211막과 PFSA/PBI막을 체결해 전해질 용액을 순환시키며 전기를 가하지 않은 상태에서 활물질의 크로스오버를 측정하였다. PFSA/PBI 복합막은 Fig. 1에 나타낸 것처럼, e-PTFE 강화 PFSA막에 PBI를 약 0.4 um코팅하여 전체 두께 10 μm로 유효면적 25 cm^2인 막을 사용했다. 활물질 $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ (Aldrich, 99%) 0.5～2.0 M, $CrCl_3 \cdot 6H_2O$ (Aldrich, 99%) 0.5～2.0 M를 HCl

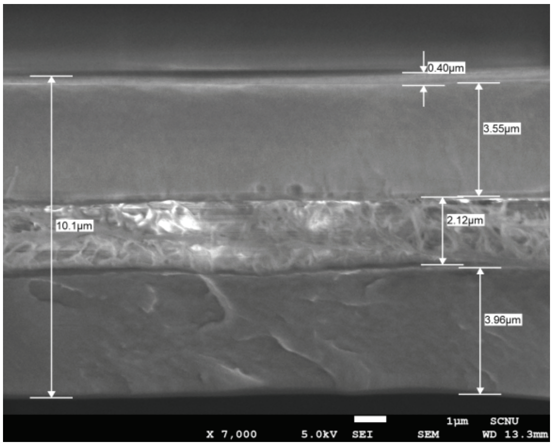


Fig. 1. SEM Image of PFSA/PBI membrne cross-section

(Aldrich, 35%) 3 M에 용해시킨 100 ml 용액을 탱크에 저장시킨 후 30~50 ml/min 유속으로 cell에 순환시키면서 크로스오버된 활물질의 농도를 측정하였다.

철 및 크롬이온의 농도는 UV 분광광도계(Varian, Cary 100 Bio UV-Visible Spectrophotometer)를 이용하여 Fe^{2+}와 Cr^{3+} 각각 332 nm, 617 nm의 흡광도를 측정해 검량곡선으로 환산하였다. 그리고 용액을 순환시키면서 철, 크롬이온의 농도를 시간에 따라 측정해 투과도를 식(3)에 의해 계산하였다.

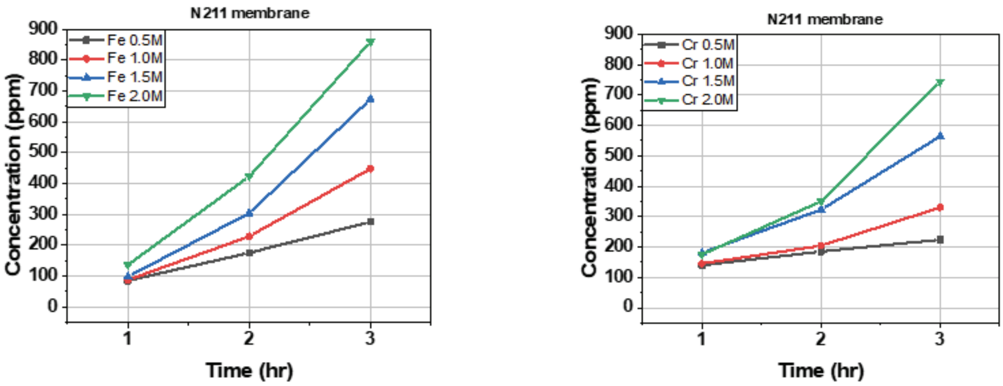
$$V\frac{dC_t}{dt} = A\frac{P}{L}(C_0 - C_t) \tag{3}$$

여기서 V는 용액 체적, C_0는 초기 농도, C_t는 t 시간에 염산 탱크의 활물질 농도, A는 용액에 접한 막의 면적, P는 활물질 이온 투과도, L은 막의 두께이다. 또한, 3 M HCl 용액에서 내구성 비교하기 위해 7일 동안 상온에서 침지 한 후 FT-IR을 통해 막을 분석하였다. 단면은 SEM (Scanning Electron Microscope, JSM-7100F, JEOL)을 이용하여 관찰하였으며 beam의 전위는 5 kV였다.

3. 결과 및 고찰

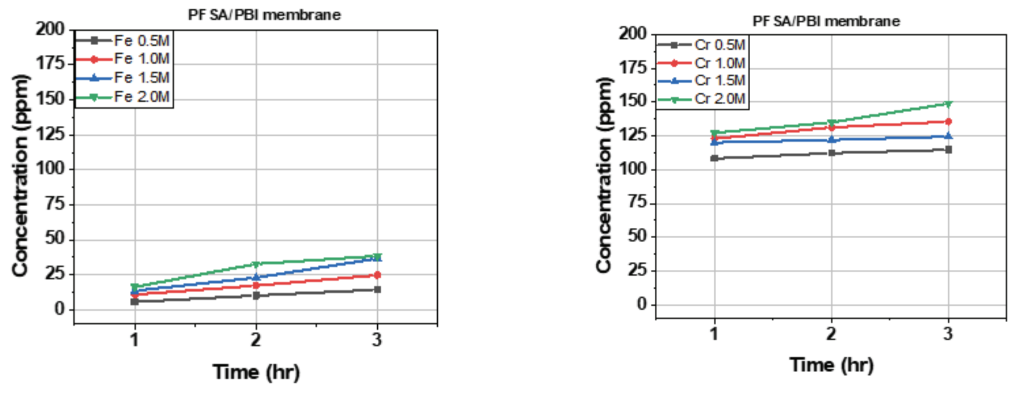
3.1 철 크롬 농도의 영향

철과 크롬이온 농도를 변화시키면서 전해질막 이온 투과도를 비교하였고, 염산 3 M에서 실험한 결과이다. Fig. 2 및 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, Nafion 211막과 PFSA/PBI 복합막 모두 농도가 증가할수록 철과 크롬 이온의 crossover가 증가하는 경향을 보였다. Fig. 4 및 Fig. 5에서 막 종류에 따라 crossover를 비교한 결과, PFSA/PBI 막은 Nafion 211에 비해 철 이온 크로스오버가 약 20배 낮은 값을 나타냈으며, 크롬이온의 경우 최대 약 5배 낮은 크로스오버가 확인되었다[11]. 투과도를 (3)식에서 계산한 결과, Nafion 211의 철과 크롬이온의 투과도는 4.3×10^{-7}, 4.1×10^{-7} cm^2/min으로 나타났다. 반면, PFSA/PBI 막은 각각 1.2×10^{-8}, 4.9×10^{-8} cm^2/min



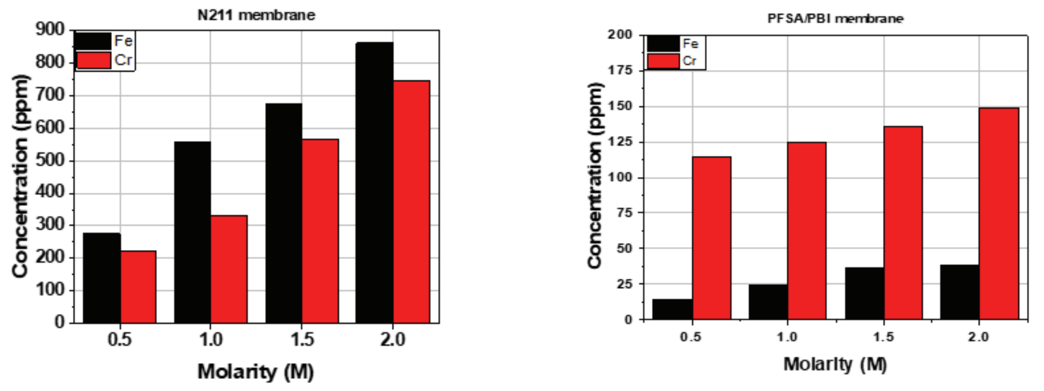
(a) (b)

Fig. 2. Crossover of ions at varying concentration for the Nafion 211 membrane (a) Fe^{2+}, (b) Cr^{3+}



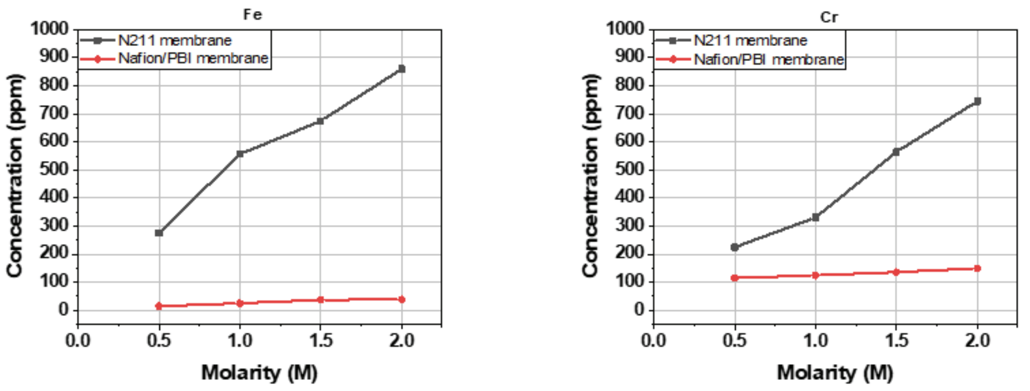
(a) (b)

Fig. 3. Crossover of ions at varying concentrations for the PFSA/PBI membrane (a) Fe^{2+}, (b) Cr^{3+}



(a) (b)

Fig. 4. Crossover of Fe^{2+} and Cr^{3+} as a function of molar concentration (a) Nafion211 membrane, (b) PFSA/PBI membrane



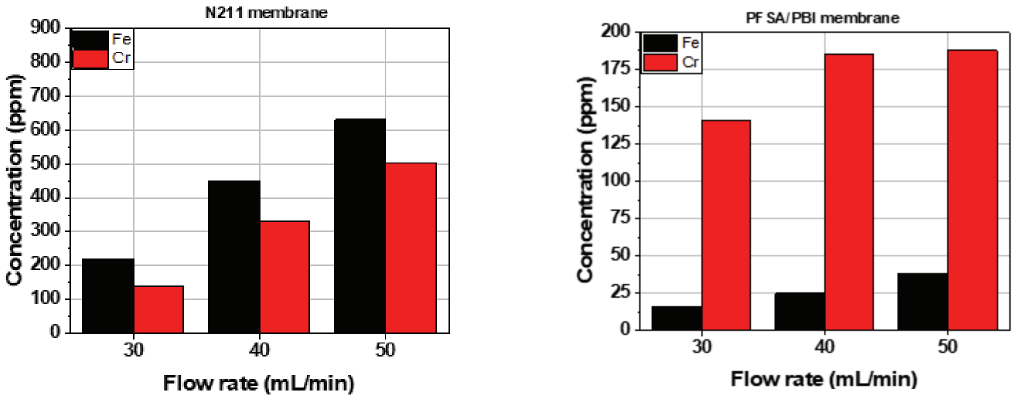
(a) (b)

Fig. 5. Ion crossover according to membrane type: (a) Fe^{2+}, (b) Cr^{3+}

으로 철이온은 약 35.8배 Nafion보다 투과도가 낮았다. 이는 기존 Nafion막 적용한 ICRFB가 활물질 크로스오버가 큰 문제점이 있었는데, PFSA/PBI막을 사용함으로써 문제를 해결할 수 있음을 보여준 것이다. Crossover에 대한 모델은 crossover 확산 모델이 대표적인데 이 모델은 막을 통한 물질의 플럭스는 농도차가 구동력이고, 투과계수는 확산계수와 용해도의 곱이라고 하였다[20]. 철과 크롬의 Nafion 막에 확산계수와 용해도를 곱한 투과계수가 크롬보다 철이 약간 크다고 할 수 있지만, PBI 막에서 철의 확산계수와 용해도를 곱한 투과계수가 크롬보다 너무 낮아서 전체적으로 PFSA/PBI 막에서는 크롬의 투과계수가 철보다 3~9배 높다. Nafion 막에서는 철의 투과도가 높은 것이 문제였는데 PBI막에서 철의 투과도를 낮춰서 약 1/20로 감소시켰다. 크롬은 PBI막을 코팅하면서 투과도가 1/5로 감소해 철에 비해 crossover 차단 효과가 작았다.

3.2 철-크롬 순환 속도의 영향

순환 속도를 30~50 mL/min 범위에서 변화시키며 철과 크롬이온의 농도 변화를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. Nafion 211막의 경우, 순환 속도가 증가함에 따라 철 및 크롬이온의 3 h 시점 crossover가 초기 대비 약 3배 증가하는 것으로 확인되었다. 반면, PFSA/PBI 막에서는 동일 조건에서 1.7배 증가해서 유량 증가에 따른 crossover 상승 폭이 Nafion 211막보다 작았다. Nafion 211막은 순환 속도 증가에 따라 투과도가 선형적으로 증가하였으



(a) (b)

Fig. 6. Crossover of Fe^{2+} and Cr^{3+} as a function of flow rate (a) Nafion 211 membrane, (b) PFSA/PBI membrane

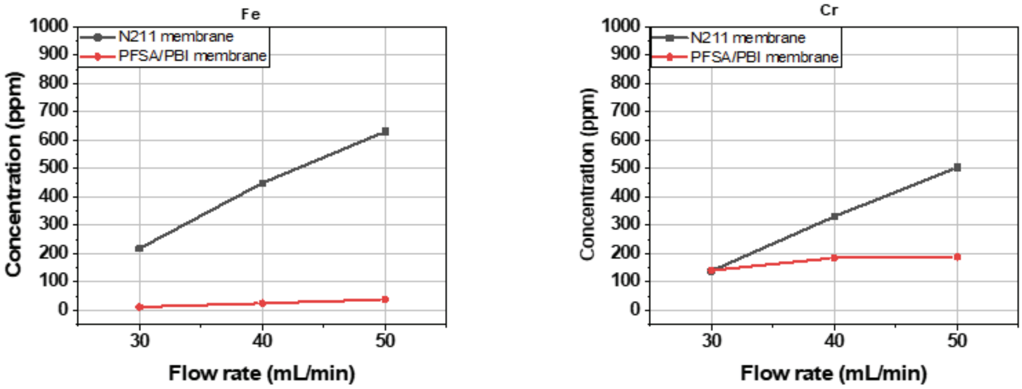
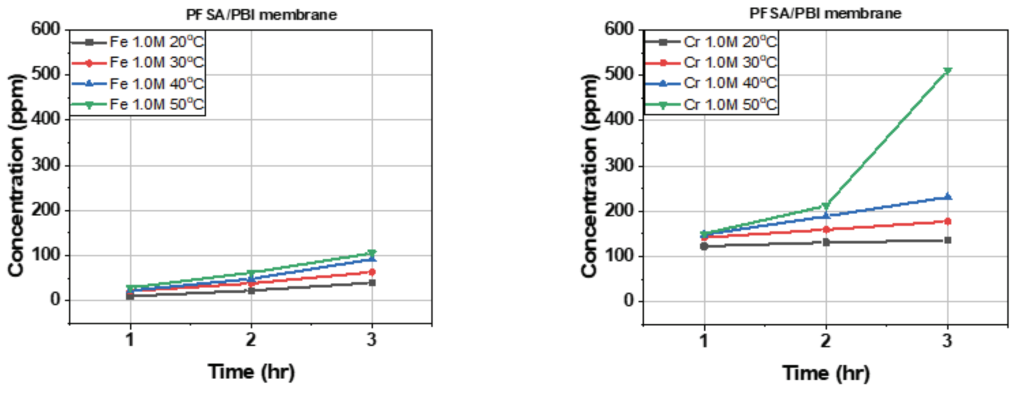


Fig. 7. Ion crossover according to membrane type: (a) Fe^{2+}, (b) Cr^{3+}

나, PFSA/PBI막은 증가하다 일정해지는 경향으로 나타났다. 이와 같은 경향은 외곽층에 있는 PBI막이 투과도가 낮은 율속단계(Rate Determining Step)여서 PBI의 용해도 및 확산계수의 특성이 반영된 결과라고 본다. PBI의 imidazole기가 금속 양이온(Fe^{2+}, Fe^{3+}, Cr^{3+})과 배위 결합 또는 약한 상호작용을 형성하여, 이오노머 cluster 내에서 자유 확산 가능한 이온의 농도를 감소시키고 실질적인 확산계수(D)를 저하시켰기 때문이다[21]. 순환 속도 증가에 따른 이러한 경향은, 강제 대류로 인해 막 표면에서의 이온 농도(boundary layer concentration)가 상승하고, 이에 따라 양측 전해액 간 농도 구배(concentrationgradient)가 증가하여 막을 통한 확산 플럭스가 커졌기 때문으로 해석할 수 있다. 따라서 이온투과에 기인한 Fe-Cr RFB의 효율 감소만을 고려할 경우, 순환 속도를 낮추는 것이 활물질 크로스오버를 줄이는 데 유리함을 제시한 것이다.

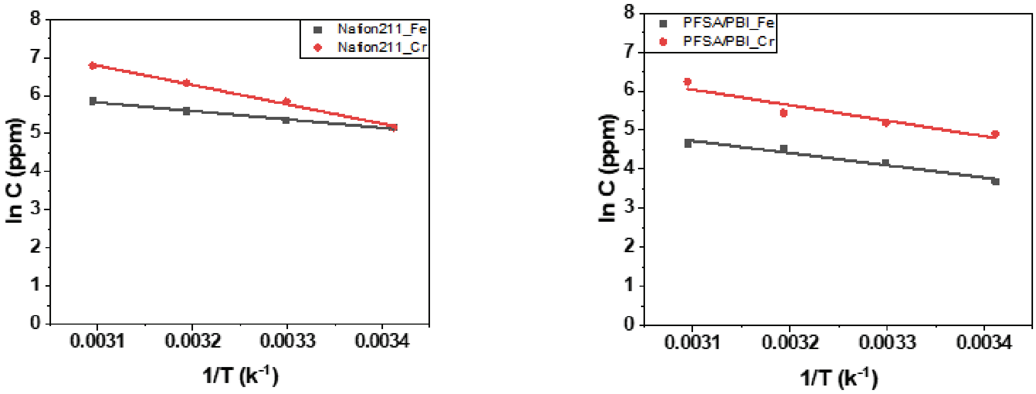
3.3 온도의 영향

PFSA/PBI막의 온도를 20~50°C 범위에서 변화시키며 철과 크롬이온 crossover을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 온도가 증가함에 따라 투과된 이온의 농도가 상승하는 경향을 확인할 수 있었다. 물질 전달의 온도 의존성은 일반적인 반응속도와 유사하게 Arrhenius 식을 따르므로, Fig. 9에 Arrhenius 플롯을 통해 온도 영향성을 비교하였다. Arrhenius



(a) (b)

Fig. 8. Crossover for the PFSA/PBI membrane as a function of temperature (a) Fe^{2+}, (b) Cr^{3+}



(a) (b)

Fig. 9. Arrhenius plots of membranes at varying temperatures (a) Nafion 211 membrane (b) PFSA/PBI membrane

플롯의 기울기로부터 계산된 활성화 에너지는 Nafion 211막에서 철과 크롬이온이 각각 18.4 및 42.4 kJ/mol, PFSA/PBI 복합막에서 각각 13.5 및 33.1 kJ/mol로 나타났다. 두 막 모두에서 크롬이온이 철이온보다 높은 활성화 에너지값을 보였으며, 동일 이온 기준으로 철과 크롬이온 모두 PFSA/PBI막의 활성화 에너지가 더 낮은 것을 확인하였다[22].

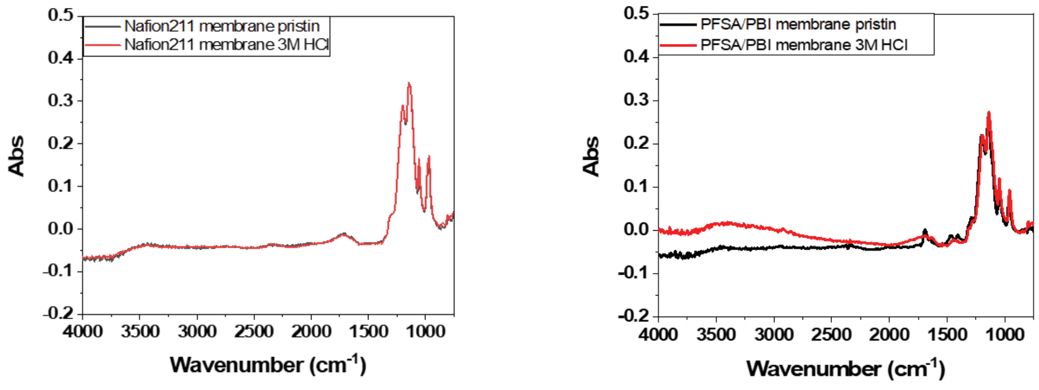
활성화 에너지가 감소한 이유는 PBI의 imidazole기가 금속 양이온(Fe^{2+}, Fe^{3+}, Cr^{3+})과 배위 결합 또는 약한 상호작용을 형성하는데, 이러한 상호작용은 온도 증가에 크게 영향을 받지 않아, 온도 의존성 감소가 곧 활성화 에너지 감소로 이어진 것으로 볼 수 있다. 또한, 순수 Nafion은 온도 상승 시 빠르게 수화도가 증가하고 친수성 cluster가 팽창하여 이온 이동이 급증하지만, PBI는 상대적으로 물을 덜 흡수하고, Nafion의 과도한 channel swelling을 억제하여 온도상승에 따른 물리적 확장 효과가 작아 활성화 에너지가 감소한 것이다. 결과적으로 PFSA/PBI 복합막은 온도상승 시에도 구조적 안정성과 낮은 수화 팽창 특성을 유지하여, 기존 불소계 막 대비 활물질 crossover 증가를 효과적으로 억제할 수 있음을 보인 것이다.

3.4 염산 용액에서 내구성 비교

Nafion 211 막은 내구성이 우수한 불소계 고분자 막이지만, 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 구동 환경에서는 라디칼 및 과산화수소에 의한 화학적 열화가 발생하여 막 수명이 짧아지는 문제가 보고되어 왔다[23,24].

Fig. 10은 철–크롬 RFB (ICRFB) 환경에서 Nafion 211과 PFSA/PBI 복합막의 내구성을 비교하기 위해, 두 막을 3 M 염산에 7일간 침지 한 후 분석한 결과를 FT-IR로 분석하였다. Nafion 211 막은 침지 전 후 무게 변화가 거의 없었으며, FT-IR 분석에서도 특성 피크의 변화가 관찰되지 않아 산성 환경에서의 화학적열화가 발생하지 않았음을 확인하였다. PFSA/PBI 막 역시 침지 후 큰 구조적 변화는 관찰되지 않았다. PBI의 고유 흡수 피크인 1443 cm^{-1} 흡수 피크가 약간 감소 한 것은 PBI의 imidazole기와 염산의 상호작용으로 인하여 감소 되었음을 알 수 있다[24,25].

ICRFB는 산소 환원 반응이 존재하지 않으며 라디칼 생성 경로가 없어 상대적으로 높은 내구성을 보인다. 따라서 Nafion 기반 막뿐 아니라 PEMFC 구동 조건에서는 수소와 산소가 백금 촉매층에서 반응하며 라디칼(·OH, ·OOH) 또는 과산화수소가 생성되어 고분자막 분해를 촉진 PFSA/PBI 복합막 또한 ICRFB 환경에서는 화학적 안정성을 유지하며, 장기간 운전 시에도 구조적 열화가능성이 매우 낮음을 확인할 수 있다[20].



(a) (b)

Fig. 10. FT-IR analysis of membranes before and after degradation (a) Nafion 211 membrane, (b) PFSA/PBI membrane

4. 결 론

철-크롬 산화 환원 흐름 전지에서 활물질인 철과 크롬이온의 크로스오버를 감소시키기 위해 이용한 PFSA/PBI 복합막의 성능과 안정성을 Nafion 211막과 비교해 실험한 결과를 정리하면 다음과 같다.

철 및 크롬이온 농도를 변화시키며 측정한 결과, 두 막 모두에서 농도 증가에 따라 크로스오버가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 PFSA/PBI 복합막은 Nafion 211 대비 철과 크롬 각각 약 1/20, 1/5로 감소하였다. 이는 PBI의 금속 이온과의 상호작용으로 이온의 확산계수 감소에 기인한 것으로 판단한다.

순환 속도에 따른 크로스오버 분석에서, Nafion 211 막은 유량 증가 시 3배 이상의 상승폭을 보였으나, PFSA/PBI 복합막은 증가 폭이 상대적으로 작았다.

특히 PFSA/PBI 복합막에서 크롬이온의 크로스오버가 철이온보다 약 10배 높게 나타나는 특성은 PBI의 금속 이온과 철, 크롬이온의 선택적 상호작용과 관련된 것으로 판단된다.

온도 변화 실험에서는 두 막 모두에서 온도 증가에 따른 이온투과 증가가 확인되었으나, Arrhenius 분석 결과 PFSA/PBI 복합막의 활성화 에너지가 더 낮게 나타났다. 이는 PBI가 PFSA막보다 수화 팽창과 채널 확장의 온도 의존성을 감소시킨 결과라고 본다.

3 M HCl에서 7일간 침지 한 후 내구성 평가에서, Nafion 211 막과 PFSA/PBI 모두 무게 변화 및 FT-IR 스펙트럼 변화가 거의 없어 강산 조건에서도 우수한 화학적 안정성을 보였다. 이는 라디칼 생성이 없는 ICRFB 환경에서 두 막 모두 PEMFC 조건에서보다 높은 장기 안정성을 확보함을 의미한다.

따라서, PFSA/PBI 복합막은 기존 Nafion 막 대비 철 및 크롬이온 크로스오버 억제, 낮은 온도 의존성, 우수한 화학적 안정성을 동시에 확보하여 ICRFB 시스템의 성능 및 수명을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체제(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-14-003)

References

1. C. Ponce de León, A. Frías-Ferrer, J. González-García, D. A. Szánto, and F. C. Walsh, “Redox flow cells for energy conversion”, Journal of Power Sources, Vol. 160, No. 1, 2006, pp. 716-732, doi: http://dx.doi.org/ 10.1016/j.jpowsour.2006.02.095.
2. H. Prifti, A. Parasuraman, S. Winardi, T. M. Lim, and M. Skyllas-Kazacos, “Membranes for redox flow battery applications”, Membranes, Vol. 2, No. 2, 2012, pp.275-306, doi: https://doi.org/10.3390/membranes2020275.
3. V. Viswanathan, A. Crawford, D. Stephenson, S. Kim, W. Wang, B. Li, G. Coffey, E. Thomsen, G. Graff, P. Balducci, M. Kintner-Meyer, and V. Sprenkle, “Cost and performance model for redox flow batteries”, Journal of Power Sources, Vol. 247, 2014, pp. 1040-1051, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.023.
4. W. Wang, Q. Luo, B. Li, X. Wei, L. Li, and Z. Yang, “Recent progress in redox flow battery research and development”, Advanced Functional Materials, Vol. 23, No. 8, 2013, pp. 970-986, doi: https://doi.org/10.1002/adfm.201200694.
5. Y. K. Zeng, T. S. Zhao, L. An, X. L. Zhou, and L.Wei, “A comparative study of all-vanadium and iron-chromium redox flow batteries for large-scale energy storage”, Journal of Power Sources, Vol. 300, 2015, pp. 438-443, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.100.
6. E. Hollax and D. S. Cheng, “The influence of oxidative pretreatment of graphite electrodes on the catalysis of the Cr^{3+}/$Cr^{2+}$and Fe^{3+}/Fe^{2+} Redox Reactions”, Carbon, Vol. 23, No. 6, 1985, pp. 655-664, doi: https://doi.org/10.1016/0008-6223(85)90225-8.
7. C. D. Wu, D. A. Scherson, E. J. Calvo, E. B. Yeager, and M. A. Reid, “A bismuth-based electrocatalyst for the chromous-chromic couplein acid electrolytes”, Journal of Electrochemical Soiety, Vol. 133, No. 10, 1986, pp. 2109-2112, doi: https://doi.org/10.1149/1.2108351.
8. D. S. Cheng and E. Hollax, , “The influence of thallium on the redox reaction Cr^{3+}/Cr^{2+}”, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 132, No. 2, 1985, pp. 269-273, doi: https://doi.org/10.1149/1.2113807.

9. R. F. Gahn, N. H. Hagedorn, and J. S. Ling, "Single Cell Performance Studies on the Fe/Cr Redox Energy Storage System Using Mixed Reactant Solutions at Elevated Temperature", NTRS - NASA Technical Reports Server, TM-83385, 1983.
10. C. Y. Sun and H. Zhang, "Investigation of Nafion series membranes on the performance of iron-chromium redox flow battery", International Journal of Energy Research, Vol. 43, Issue 14, 2019, pp. 7711-8928, doi: https://doi.org/10.1002/er.4875.
11. Y. S. Kim, S. H. Oh, , E. Kim, D. Kim, S. Kim, C. H. Chu, and K. Park, "Iron-chrome crossover through Nafion membrane in iron-chrome redox flow battery", Korean Chemical Engineering Research, Vol. 56, No. 1, 2018, pp. 24-28, doi: https://doi.org/10.9713/kcer.2018.56.1.24.
12. H. Zhang, H. Zhang, X. Li, Z. Mai, W. Wei, and Y. Li, "Crosslinkable sulfonated poly(diallyl-bisphenol ether ether ketone) membranes for vanadium redox flow battery application", Journal of Power Sources, Vol. 217, No. 1, 2012, pp. 309-315, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.030.
13. C. Fujimoto, S. Kim, R. Stains, X. Wei, L. Li, and Z. G. Yang, "Vanadium redox flow battery efficiency and durability studies of sulfonated Diels Alder poly(phenylene)s", Electrochemistry communications,Vol. 20, 2012, pp. 48-51, doi: https://doi.org/10.1016/j.elecom.2012.03.037.
14. G. J. Hwang and H. Ohya, "Preparation of cation exchange membrane as a separator for the all-vanadium redox flow battery", Journal of Membrane Science, Vol. 120, No. 1, 1996, pp. 55-67, doi: https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00135-4.
15. S. J. Seo, B. C. Kim, K. W. Sung, J. Shim, J. D. Jeon, K. H. Shin, S. H. Shin, S. H. Yun, J. Y. Lee, and S. H. Moon, "Electrochemical properties of pore-filled anion exchange membranes and their ionic transport phenomena for vanadium redox flow battery applications", Journal of Membrane Science, Vol. 428, 2013, pp. 17-23, doi: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.027.
16. S. G. Park, N. S. Kwak, C. W. Hwang, H. M. Park, and T. S. Hwang, "Synthesis and characteristics of aminated vinylbenzyl chloride-co-styrene-co-hydroxy ethyl acrylate anionexchange membrane for redox flow battery applications", Journal of Membrane Science, Vol. 423-424, 2012, pp. 429-437, doi: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.08.040.
17. S. Y. So, Y. J. Yoon, T. H. Kim, K. Yoon, and Y. T. Hong, "Sulfonated poly(arylene ether sulfone)/functionalized silicate hybrid proton conductors for high-temperature proton exchange membrane fuel cells", Journal of Membrane Science, Vol. 381, No. 1-2, 2011, pp. 204-210, doi: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.07.024.
18. S. Zhang, B. Zhang, D. Xing, and X. Jian,"Poly (phthalazinone ether ketone ketone) anion exchange membranes with pyridinium as ion exchange groups for vanadium redox flow battery applications", Journal of Materials Chemistry A, Vol. 1, Issue 39, 2013, pp, 12246-12254, doi: https://doi.org/10.1039/c3ta11541k.
19. B. Zhang, S. Zhang, D. Xing, R. Han, C. Yin, and X. Jian, "Quaternized poly(phthalazinone ether ketone ketone) anion exchange membrane with low permeability of vanadium ions for vanadium redox flow battery application," Journal of Power Sources, Vol. 217, Issue 1, 2012, pp. 296-302, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.027.
20. J. J. Giner-Sanz, E. M. Ortega, and V. Pérez-Herranz, "Hydrogen crossover and internal short-circuit currents experimental characterization and modelling in a proton exchange membrane fuel cell", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, No. 25, 2014, pp. 13206-13216, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.157.
21. J. Wu, C. Liao, T. Li, J. Zhou, L. Zhang, J. Q. Wang, G. Li, and X. Li, "Metal-coordinated polybenzimidazole membranes with preferential K+ transport", Nature Communications, Vol. 14, 2023, pp. 1149, doi: https://doi.org/10.1038/s41467-023-36711-w.
22. A. Barjola, J. Escorihuela, A. García-Bernabé, Ó. Sahuquillo, E. Giménez, and V. Compañ, "Diffusivity and free anion concentration of ionic liquid composite polybenzimidazole membranes", RSC Advances, Vol. 11, No. 42, 2021, pp. 26379–26390, doi: https://doi.org/10.1039/D1RA05364G.
23. T. Kim, H. Lee, W. Sim, J. Lee, S. Kim, T. Lim, and K. Park, "Degradation of proton exchange membrane by Pt dissolved/deposited in fuel cells", Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 26, No. 5, 2009, pp. 1265-1271, doi: https://doi.org/10.1007/s11814-009-0212-9.
24. J. Song, S. Kim, B. Ahn, J. Ko, and K. Park, "Effect of electrode degradation on the membrane degradation in PEMFC", Korean Chemical Engineering Research, Vol. 51, No. 1, 2013, pp. 68-72, doi: https://doi.org/10.9713/kcer.2013.51.1.68.
25. Suryani, Y. N. Chang, J. Y. Lai, and Y. L. Liu, "Polybenzimidazole (PBI)-functionalized silica nanoparticles modified PBI nanocomposite membranes for proton exchange membranes fuel cells", Journal of Membrane Science, Vol, 403-404, Issue 1, 2012, pp. 1-7, doi: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.01.043.