

이온교환막의 균질/비균질 표면 형상에 따른 전기 와류 가시화 및 전기적 특성 분석

조명현¹ · 최진웅¹ · 김범주^{1,2†}

¹공주대학교 미래융합공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Visualization and Electrical Response of Electroconvective Vortices on the Surface of Homo/Heterogeneous Ion Exchange Membranes

Myeonghyeon Cho¹, Jinwoong Choi¹, and Bumjoo Kim^{1,2†}

¹Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Republic of Korea

²Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Republic of Korea

(Received December 26, 2022 : Revised January 8, 2023 : Accepted January 17, 2023)

Abstract The electromembrane process, which has advantages such as scalability, sustainability, and eco-friendliness, is used in renewable energy fields such as fuel cells and reverse electrodialysis power generation. Most of the research to visualize the internal flow in the electromembrane process has mainly been conducted on heterogeneous ion exchange membranes, because of the non-uniform swelling characteristics of the homogeneous membrane. In this study, we successfully visualize the electroconvective vortices near the Nafion homogeneous membrane in PDMS-based microfluidic devices. To reinforce the mechanical rigidity and minimize the non-uniform swelling characteristics of the homogeneous membrane, a newly developed swelling supporter was additionally adapted to the Nafion membrane. Thus, a clear image of electroconvective vortices near the Nafion membrane could be obtained and visualized. As a result, we observed that the heterogeneous membrane has relatively stronger electroconvective vortices compared to the Nafion homogeneous membranes. Regarding electrical response, the Nafion membrane has a higher limiting current and less overlimiting current compared to the heterogeneous membrane. Based on our visualization, it is assumed that the heterogeneous membrane has more activated electroconvective vortices, which lower electrical resistance in the overlimiting current regime. We anticipate that this work can contribute to the fundamental understanding of the ion transport characteristics depending on the homogeneity of ion exchange membranes.

Key words ion exchange membrane, Nafion 211, homogeneity, heterogeneity, electroconvective vortex.

1. 서 론

이온교환막(ion exchange membrane, IEM)이란 전기장 하에서 이온을 선택적으로 투과시키는 성질을 가지는 막으로, 투과이온의 극성에 따라 양이온교환막(cation exchange membrane, CEM)과 음이온교환막(anion exchange membrane, AEM)으로 나눌 수 있다. 선택적으로 이온을 투과시키는 이온교환막의 특성¹⁾을 이용하여 투석(dialysis),²⁾ 전기

투석(electrodialysis)³⁾ 등의 전통적인 분리 공정에 활용되어 왔으며, 최근에는 연료전지(fuel cell),⁴⁾ 흐름전지(flow battery),⁵⁾ 수전해(electrolysis),⁶⁾ 역전기투석(reverse electrodialysis)⁷⁾ 발전 등 배터리 및 재생에너지 분야에서도 주목받고 있다. 특히, 이온교환막을 활용한 전기막 공정(electromembrane process)은 시스템 설계 및 제작의 자유도가 높아 장치의 확장성이 높고, 전기에너지로 구동되는 지속 가능한 친환경 에너지 기술로 많은 장점을 가진다.^{8,9)}

[†]Corresponding author

E-Mail : bumjoo@kongju.ac.kr (B. Kim, Kongju Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기존의 전기막 공정에서 이온교환막에 관한 연구는 기술적인 한계로 막 계면에서 일어나는 미시적인 현상에 대한 접근보다는 거시적인 측면에서 입력과 출력에 기반한 분석이 주로 진행되었다. 하지만 최근에는 미세가공(micro fabrication) 기술에 기반한 미세 유체(microfluidics) 시스템 연구의 확대에 의해 내부 유동을 실시간으로 모니터링할 수 있는 유동 가시화가 용이해져 더 직관적인 현상 분석과 변수의 최적화가 가능하게 되었다.¹⁰⁻¹²⁾

또한 이온교환막의 비균질성에 의한 변화와 관련한 연구는 Ali Mani 등^{13,14)}에 의해 역학적 모델링 및 시뮬레이션을 통한 이론적 연구가 진행되었으며, 미세유체 시스템에서의 실험을 통한 검증 연구가 수행되었다. 그럼에도 불구하고, 균질(homogeneous) 이온교환막의 경우, 약한 기계적 강성과 불균일한 팽윤(swelling) 특성으로 인해 이온교환막 근처에서 일어나는 전기 와류 현상의 가시화는 대부분 비균질(heterogeneous) 이온교환막 위주로 진행되었다.^{15,16)} 균질 이온교환막의 경우, Mikhaylin, Sergey 등¹⁷⁾은 균질 양이온 교환막인 ASTOM사의 CMX-SB를 활용하여 막의 구조 및 표면특성에 의한 이온 전달 및 전기 와류 유동을 가시화하였으며 용액과 이온교환막의 종류에 따른 막 오염(fouling) 영향을 확인하였다. Pismenskaya, Natalia 등¹⁸⁾은 Neosepta사의 균질 음이온 교환막인 AMX를 활용한 전기막공정의 유동 가시화와 대시간 전위차법(chrono-potentiometry) 분석을 활용하여 전기 와류의 크기가 양성자 생성에 반비례하는 경향을 발견하였다. Gil, V. V. 등¹⁹⁾은 Shchekinoazot사의 비균질 이온교환막인 MA-41과 MK-40의 표면에 균질 이온교환물질인 나피온 용액을 코팅하여 유동 가시화를 진행하였다. 이처럼 균질 이온교환막에 대한 연구는 가시화를 위한 기술적인 한계로 인해 선행 연구가 적고, 가시화의 결과물도 비균질 이온교환막에 비해 이미지가 획득이 명확하지 않다. 최근에는 Dupont사의 상용화된 고체 나피온 이온교환막을 활용한 유동 가시화 연구가 보고되었지만²⁰⁾ 전기 와류 관찰 방향이 이온교환막의 수직 위 방향이었기 때문에 측면에서 보는 전기 와류의 형성과 성장을 면밀하게 관찰하는 데에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 균질 이온교환막의 약점인 기계적 강성 및 불균일한 팽윤 특성을 보완하여 나피온 균질 이온교환막의 전기 와류를 가시화하고자 한다. 이를 위해 이온교환막 팽윤 지지체(IEM swelling supporter)를 개발해 나피온 이온교환막의 불균일한 팽윤을 최소화하여 전압에 따른 전기 와류의 생성과 성장을 명확하게 관찰하고자 한다. 또한, 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 활용한 표면 이질성 차이를 관찰하고, 비균질 이온교환

막인 Mega사의 Ralex CMHPP 모델과 가시화 및 전기적 특성 비교 실험을 진행하고자 한다.

2. 이론 및 실험방법

2.1. 이론적 배경

Fig. 1(a)는 이온교환막을 활용한 공정의 일반적으로 잘 알려진 전류-전압 특성 곡선으로 전류의 증가 양상에 따라 Ohmic 구간, 한계 전류(limiting) 구간, 과한계 전류(over-limiting) 구간으로 나뉘게 된다. 이온교환막 표면의 확산 한계 현상의 발생(한계전류, I_{lim}) 이후, 추가적인 전류의 상승은 이온교환막 표면에서의 전류 집중 및 이온의 국소적 농도 차이로 인한 수평방향의 유동으로 생성되는 전기 와류에 기인한다. 이처럼 수평방향의 유동으로 인한 소용돌이 표면 유동을 2종 전기삼투 흐름(second kind of electro-osmotic flow)이라고 칭하며, 2종 전기삼투 흐름을 발생하

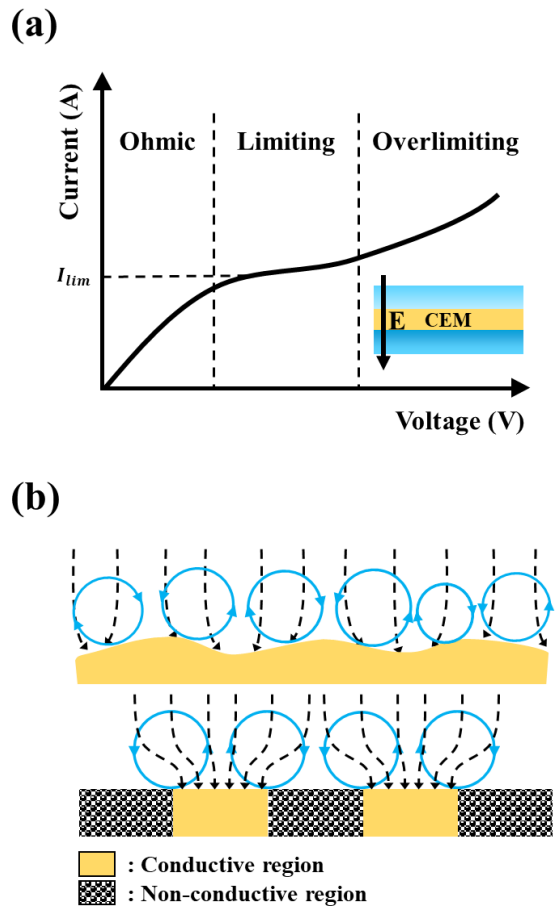


Fig. 1. (a) Typical current (I) - voltage (V) curve of electromembrane system. (b) Distribution of current streamlines and formation of electroconvective vortices on the ion exchange surface depending on the electrical and topographical heterogeneity.

계 하는 요인에는 이온교환막의 표면 이질성, 비균질성, 기하학적 구조 등이 있다.^{12,21,22)}

Fig. 1(b)에서는 이온교환막 표면의 기하학적 형상 및 표면 비균질성에 의한 전류선의 집중을 나타냈다. 전기와류 현상의 원인 중 하나인 이온교환막의 비균질성은 이온교환막의 불균일한 전기적 특성으로 인해 발생한다. 이온교환막은 이온교환물질로만 이루어진 균질교환막과, 기계적 강성을 증가시키기 위해 강화제(mechanical reinforcement) 및 화학적 지지재(polymer binder)를 첨가한 비균질 이온교환막이 있다. 따라서 비균질 이온교환막의 경우 이온 교환이 가능한 전도성 영역과 이온 교환이 불가능한 비전도성 영역도 존재하기 때문에 전류 집중, 국소이온농도의 변화를 야기해 전기 와류를 촉진시킨다.²³⁻²⁵⁾

2.2. 실험장치 제작

본 연구에서는 마이크로 유체 디바이스를 제작하여 전기막 시스템의 내부 유동 가시화 및 전기신호 측정을 진행하였다. 마이크로 유체 디바이스의 경우 선행연구에서 제작한 polydimethylsiloxane (PDMS) 기반의 이온교환막 디

바이스를 동일한 방식으로 제작하였다.^{10,15,16)} Fig. 2(a)에서는 마이크로 유체 디바이스의 개략도(평면도)를 나타냈다. PDMS 디바이스의 경우 2개의 전극, 2개의 이온교환막, 1개의 메인 채널과 2개의 전극 린싱 채널, 각각 3개의 용액 주입구와 배출구로 구성된다. 장치의 최외곽에는 카본페이퍼가 삽입되어 각각 양극과 음극으로 사용된다. 이후 1개의 메인 채널과 2개의 린싱 채널이 형성되도록 메인 채널과 린싱 채널 사이에 2개의 CEM이 삽입된다. 채널 길이의 경우, CEM과 수용액이 실제 맞는 유효 이온교환 길이(effective length, L_{eff})는 12 mm로 고정되었으며 채널의 높이는 0.2 mm, 폭은 1.5 mm로 각각 고정되었다. 실험에 사용된 균질 이온교환막은 Dupont사의 Nafion 211이, 비균질 이온교환막은 MEGA사의 Ralex CMHPP가 사용되었으며, 각각 이온교환막의 기계적, 전기화학적 물성치는 Table 1에 나타났다.²⁶⁻²⁹⁾

본 연구에서는 균질 이온교환막의 약한 기계적 강성을 보완하기 위하여 팽윤 지지체를 자체적으로 설계/개발하여 사용하였다. Fig. 2(b)에서는 팽윤 지지체를 활용한 이온교환막 지지구조를 나타냈다. 균질 이온교환막은 2개

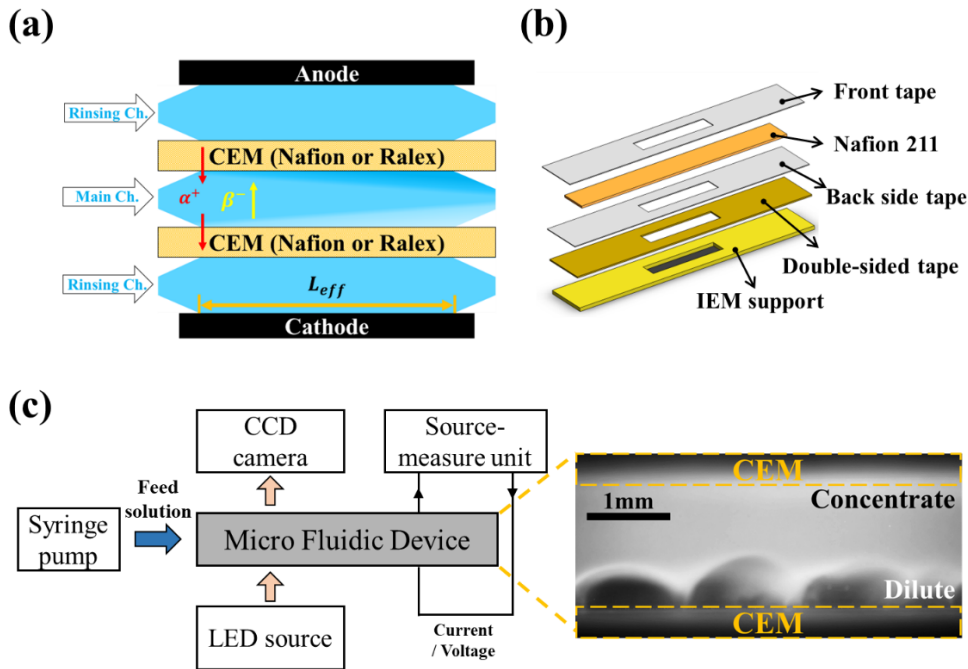


Fig. 2. Schematic view of (a) PDMS-based microscale electromembrane system and (b) exploded view of swelling support. (c) Experimental setup and example of fluorescent images of electroconvective vortices near ion exchange membrane.

Table 1. Electrochemical and mechanical properties of Nafion 211 and Ralex CMHPP.²⁶⁻²⁹⁾

Membrane	Thickness (μm)	Water content (wt%)	Permselectivity	Conductivity (mS/cm)	IEC (meq/g)
Nafion 211	25	5	-	26.5	0.92
Ralex CMHPP	450	30	>0.90	6.37	2.4

의 테이프(3M Co., No. 810, USA)와 양면테이프(3M Co., 9322-08, USA), 이온교환막 지지대(MEGA, Ralex AMHPP, Czechia)로 지지되는 구조를 가진다. 메인 채널에 노출되는 방향(front)에는 전면부 테이프가 부착되어 균질 이온교환막을 지지하며, 메인 채널의 용액과 균질이온교환막의 접촉을 위해 UV레이저를 활용하여 유효교환길이(12 mm) 만큼 노출되도록 절단된 후 부착한다. 린싱 채널에 노출되는 방향에는 후면부 테이프와 지지용 이온교환막, 그리고 테이프와 지지용 이온교환막을 접착하기 위한 양면테이프가 사용되었으며, 전면부와 동일하게 모든 구성요소가 유효교환길이만큼 절단 가공되어 부착된다. 이를 통해 메인 채널과 린싱 채널의 용액에는 균질 이온교환막만이 접촉하여 이온교환을 하게 된다. 지지용 이온교환막의 경우 채널의 누수(leakage)를 방지하기 위한 팽윤을 위해 사용되었다. 지지용 이온교환막은 메인 채널과 3중(두 개의 테이프 및 양면테이프)으로 차단되어 채널 간의 이온교환 및 시스템의 전기적 신호에는 영향을 미치지 않는다.

2.3. 실험 방법

Fig. 2(c)는 실험 장치와 셋업을 보여준다. 마이크로 유체 장치에는 시린지 펌프(syringe pump, Fusion 200-X, Chemyx, Inc.)를 활용하여 유체를 공급하였다. 메인 채널에는 염화

나트륨(NaCl, 10 mM)용액이, 린싱 채널에는 황산 나트륨 수용액(Na_2SO_4 , 5 mM)이 사용되었으며, 유동가시화를 위해 메인 채널에 형광염료를 혼합한(Alexa 488 Triethylammonium, Thermo Fisher Scientific, 19.09 μM) 용액을 사용하였다. 전류/전압 인가 및 측정을 위해 SMU (source measurement unit, Keithley 2460, Keithley Instruments, Inc.)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표면 형상 관찰

Fig. 3은 균질 및 비균질 이온교환막의 표면을 촬영한 SEM 사진이다. 균질 이온교환막인 Nafion 211 [Fig. 3(a, c)]의 표면은 이물질이나 비균질성을 야기하는 물질을 확인할 수 없으며 매끈한 이온교환 표면을 가지는 것을 확인할 수 있다. 단, 이온교환막이 팽윤된 상태에서는 Fig. 1(b)에서 나타낸 바와 같이 균질 이온교환막의 표면이 편평하지 않고 굴곡이 있는 상태가 되거나, 혹은 이온교환막의 표면에 마이크로 사이즈의 기공이 형성되어 표면의 기하학적 형상에 의해 전기 와류가 생성된다.^{23,30)} 이에 반해 비균질 이온교환막인 Ralex CMHPP의 표면을 보면[Fig. 3(b, d)] 구조적 강화를 위한 메쉬 타입의 구조 지지체[Fig. 3(b)]와 더불어

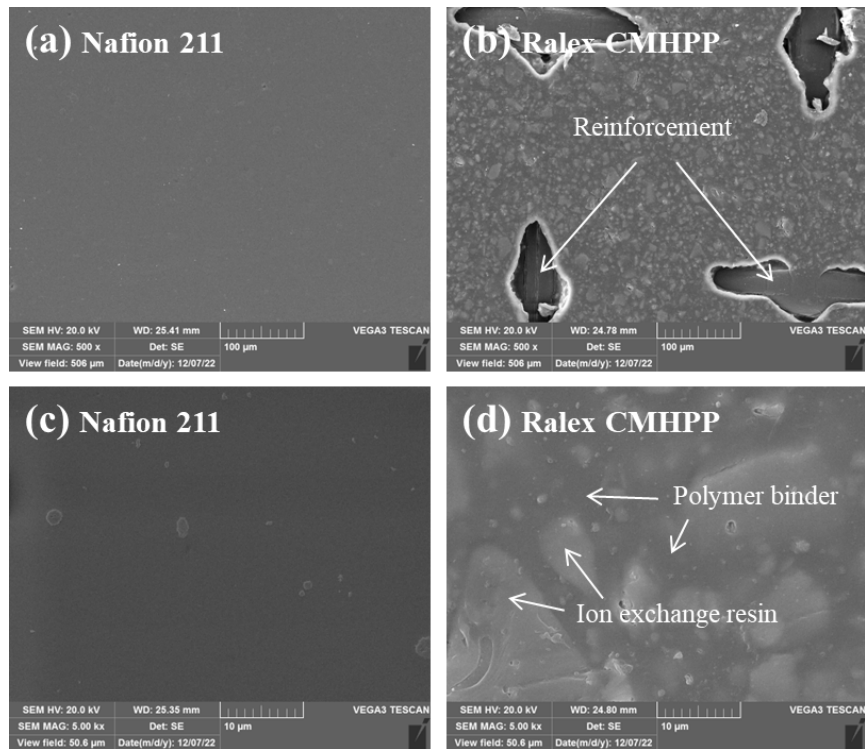


Fig. 3. SEM images of the Nafion 211 and Ralex CMHPP. (a) Nafion 211 500 \times . (b) Ralex CMHPP 500 \times . (c) Nafion 211 5000 \times . (d) Ralex CMHPP 5000 \times .

어 이온교환 레진을 지지하기 위한 폴리머 바인더가 함께 결합된 형태[Fig. 3(d)]로 제작된다. 폴리머 바인더와 구조적 강화제의 경우 이온교환 능력이 없는 비전도성 영역을 형성하게 되며 전기 와류의 원인인 전류 집중 및 국소적 이온 농도차를 유발한다.

3.2. 유동 가시화

균질 및 비균질 이온교환막의 계면에서 발생하는 전기 와류 현상을 비교하기 위해 Nafion 211과 Ralex CMHPP에 대해 가시화 실험을 진행하였다. Fig. 4는 두 이온교환막에 대해 전압 유속이 없는 경우와 있는 경우에 대해 인가된 전압(5, 10, 20 V) 별 시간(5, 10, 20, 40 s)에 따른 전기 와류의 생성 및 성장 과정을 보여준다. 전압이 인가됨에 따라, 이온이 제거되어 이온 농도가 낮아지는 이온공핍(ion depletion) 영역(검은색 영역)과 이온이 존재하는 영역(밝은 영역)이 발생한다.

■ : Nafion 211 (Homogeneous) ■ : Ralex CMHPP (Heterogeneous)

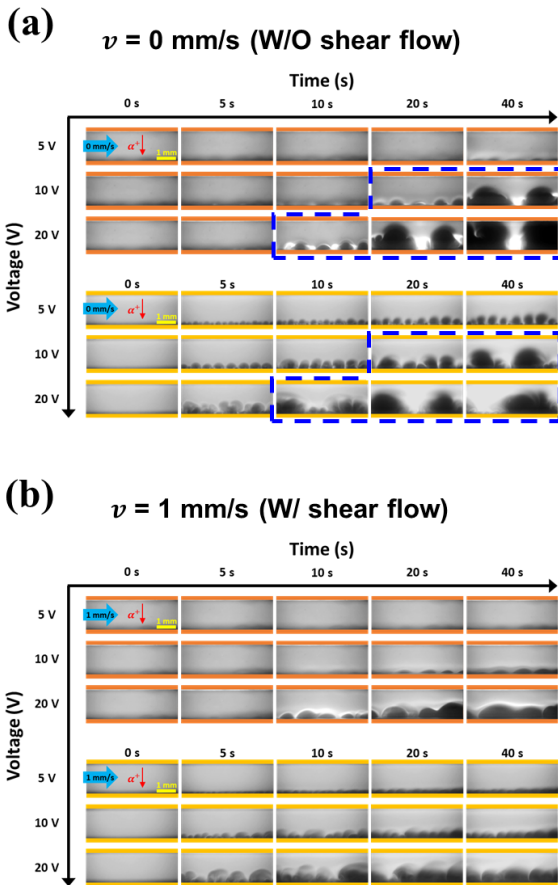


Fig. 4. Fluorescent images of electroconvective vortices near Nafion 211 and Ralex CMHPP over voltage and time (a) w/o and (b) w/ shear flow.

유속이 인가되지 않은 경우[Fig. 4(a)], 초기에는(5초 이전) Nafion 211에서는 유동의 변화를 확인하기 어렵지만, 이후 시간이 경과함에 따라 전기 와류가 발생해 계면에서 추가적인 유동이 활성화되는 것을 확인할 수 있다. 이와는 달리, Ralex CMHPP의 경우는 전압을 인가하자마자 빠르게 전기 와류가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 3에서 확인한 바와 같이 표면의 비균질성이 큰 이온교환막의 경우 100 μm 이하의 영역에서 비균질성을 가지므로 전류 집중 현상으로 인해 국소 이온 농도가 빠르게 감소하기 때문이다. 따라서 Nafion 211과 Ralex CMHPP를 비교할 때, Ralex CMHPP는 더 활발한 수평 유동을 일으켜 더 많은 개수의 전기 와류가 발생시킨다. 반면 Nafion 211의 경우 초기 발생시간이 더 길며, 넓고 완만하며 적은 개수의 전기 와류가 성장하는 것이 관찰된다. 또한, 전기 와류의 위치를 확인하였을 때(파란색 강조 박스), 균질 이온교환막의 경우 형광이 동일 위치에서 응집되며 형성된 전기 와류의 위치가 쉽게 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면 비균질 이온교환막의 경우 활발한 전기 와류에 의해 크게 합쳐진 전기대류의 경우에도 위치가 변화한다. 이는 이온전달 기작 중 surface conduction이나 electroosmotic flow보다는 전기수력학적 불안정성(electroosmotic instability, EOI)이 지배적인 본 실험에서, 이온교환막의 비균질성에 의해 전기 수력학적 불안정성이 증가한다는 것을 의미하며, 과한계전류 구간의 전류 증가와 이온교환막의 비균질성은 직접적 연관이 있음을 의미한다.³¹⁾ 또한, Nafion 211에서 쉽게 관찰되는 막 표면과 접촉각이 작은 퍼진 형태의 전기 와류는 전류 방향인 수직 방향의 전기 와류의 형성에 불리해 이온 전달의 관점에서 비효율적일 것으로 판단된다.

유속이 인가된 경우[Fig. 4(b)] 저전압(~5 V)에서는 두 이온교환막 표면에서의 이온 공핍 영역이 발생하나, 전체 채널에서는 큰 차이점 확인하기 어렵다. 이후 전압이 증가함에 따라 전기 와류가 생성되며, 계면에서 와류성 전기 대류가 활발하게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 고전압($V > 10\text{ V}$)에서 Ralex CMHPP의 유동을 살펴보면, 막 근처에서 전기 와류에 의한 농도 경계층의 증가로 이온의 혼합이 더 활발하게 일어난다. 반면 Nafion 211의 경우 유속이 없을 때와 비슷하게 완만하게 형성된 경계층을 확인할 수 있다. 채널 내 이온의 전달 측면에서 벌크 유체에서 이온교환막 표면으로의 전기 와류에 의한 이온 수송은 Nafion 211의 경우 더 불리한 것을 확인할 수 있으며, Ralex CMHPP의 경우 과한계 전류 구간에서 채널 내의 전기 와류에 의한 이온 수송이 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

3.3. 전류-전압 특성 곡선

이온교환막의 균질성에 따른 전기적 응답을 확인하기 위해 전류-전압 특성 곡선을 측정하였다(Fig. 5). 이 때 유속은 0.5 mm/s로 인가되었으며, 전압은 0 V부터 15 V까지 0.3 V 간격으로 매 간격당 30 s의 시간 동안 측정되었다. 전기 막 공정에서 확산에 의한 선형적인 전압-전류 구간이 끝나는 전류 값을 한계 전류라 하고 이는 L v que equation에 의해 지배되며^{23,24,32}) 그 식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$i_{lim}^{theor} = \frac{FDz_1C_1}{\delta(T_1 - t_1)} \quad (1)$$

여기서, F 는 패러데이 상수, D 는 전해질 확산계수, z 는 이온의 전하, C 는 용액의 몰 농도, δ 는 이온교환막의 확산경계층 두께, T 와 t 는 각각 카운터 이온(counter ion)의 유효 수송 수(transport number) 및 용액에서의 수송 수이다.

Fig. 5(a)에서 균질 이온교환막인 Nafion 211과 비균질 이온교환막인 Ralex CMHPP의 한계 전류를 비교하면, Nafion 211의 경우 한계 전류값이 3 mA/cm² 보다 높은 반면 Ralex

CMHPP의 경우 이보다 낮은 1.5 mA/cm² 부근인 것을 확인할 수 있다. 식 (1)에서 확산경계층 두께의 경우, 이온교환막의 전도성 표면의 노출 길이에 의한 영향을 받는다. 이때, Fig. 3에서 확인한 바와 같이 균질 이온교환막과 비균질 이온교환막은 마이크로 단위의 미세 구조에서 이온교환막의 실제 이온전달 면적의 차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 비균질 이온교환막의 불연속적인 전도성 면적과 비전도성 면적의 분포는 국소적으로 분포된 전도성 표면위에서 확산경계층의 빠른 성장을 초래한다. 또한, 이온교환막의 비균질성은 이온교환막 표면에서 국소적인 이온 농도차의 발생 및 전류의 집중현상을 유발하게 되므로, 한계전류 구간으로의 변화를 촉진하는 주요 요인으로 작용한다. 이러한 결과로 균질 이온교환막인 Nafion 211의 한계전류가 비균질 이온교환막인 Ralex CMHPP보다 더 높게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

전류-전압 특성 곡선을 바탕으로 Nafion 211과 Ralex CMHPP 이온교환막의 Ohmic 구간 및 한계 전류 구간의 길이, 그리고 과한계 전류 구간의 기울기에 대해 자세히 알아 보았다[Fig. 5(b)]. Ohmic 구간의 길이는 Nafion 211 (0~4 V)이 Ralex (0~2 V)에 비해 2 V 이상 더 길어, 에너지 효율이 중요한 저전압 구간에서는 균질 이온교환막이 비균질 이온교환막보다 더 유리할 수 있다. 한계 전류 구간의 길이(plateau length)의 경우, Nafion 211이 Ralex CMHPP에 비해 8배 이상 긴데, 이는 비균질 이온교환막은 막 표면의 비균질성으로 활발한 전기 와류가 형성되기 때문에 과한계 전류 구간 진입이 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 과한계 전류 구간의 기울기(overlimiting slope)는 앞선 형광 이미지에서 확인한 바와 같이 활발한 전기 와류의 형성으로 인해 비균질 이온교환막이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 요약하면 저전압 구간에서는 Ohmic 구간의 길이가 더 긴 균질 이온교환막이 이온 전달에 더 유리하지만, 고전압 구간인 과한계 전류 영역에서는 비균질 이온교환막이 전기 와류의 활발한 생성 및 성장으로 인해 이온 전달이 더 잘 일어난다고 볼 수 있다.

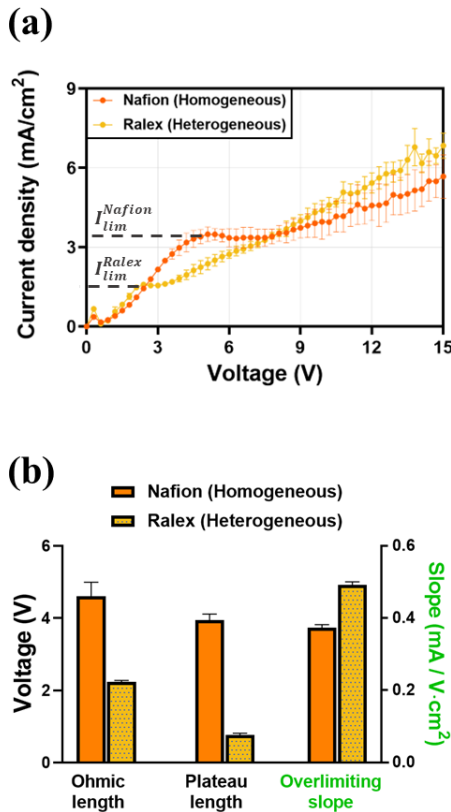


Fig. 5. (a) Electrical response of Nafion 211 and Ralex CMHPP membrane. (b) Comparison of Ohmic length, plateau length and overlimiting slope.

4. 결 론

본 연구는 이온교환막의 균질성에 의한 유동 특성 및 이온교환특성의 변화를 확인하기 위해 지금까지 기술적인 어려움이 있던 균질 이온교환막(Nafion 211)의 전기 와류를 가시화하고 이를 비균질 이온교환막(Ralex CMHPP)과 비교하였다. 이를 위해 균질 이온교환막의 불균일한 팽윤 특성을 해결하고자 팽윤지지체를 새롭게 설계 및 제작하였고, 더 자세한 균질 이온교환막의 전기 와류 현상을 관

찰할 수 있었다. PDMS 기반의 마이크로 유체 디바이스를 제작하여 전류-전압 특성 곡선을 얻었으며, SEM 이미지를 촬영해 이온교환막의 표면을 관찰하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 두 가지 사실을 확인할 수 있었다. 첫째, 전기 와류 가시화를 통해 균질 이온교환막의 전기 와류는 비균질 이온교환막에 비해 작고 넓게 퍼진 형태로 전기 와류를 통한 이온 전달에 불리함을 확인하였다. 둘째, 전류-전압 측정을 통해, 균질 이온교환막의 경우, Ohmic 구간의 길이가 길어 더 큰 한계 전류를 가지지만, 전압이 증가함에 따라 한계 전류 구간이 길고 과한계 전류 구간의 기울기가 완만해 비균질 이온교환막보다 이온 전달 측면에서 더 불리함을 확인하였다. 본 연구는 Nafion 211 뿐만 아니라 다양한 균질 이온교환막의 이온 전달 현상을 이해하는 가시화 연구에 좋은 참고가 될 것으로 보이며, 실제 나피온 막이 사용되는 연료전지 시스템의 구조체(e.g. gas diffusion layer, spacer)를 활용한 전기대류 및 유동가시화 연구가 진행된다면 실제 산업에서 응용 가능한 좋은 선행연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grants funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1F1A1064531) and (MOE) (2021RIS-004).

References

1. T. Luo, S. Abdu and M. Wessling, *J. Membr. Sci.*, **555**, 429 (2018).
2. J. Luo, C. Wu, T. Xu and Y. Wu, *J. Membr. Sci.*, **366**, 1 (2011).
3. V. V. Nikonenko, N. D. Pismenskaya, E. I. Belova, P. Sizat, P. Hugué, G. Pourcelly and C. Larchet, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **160**, 101 (2010).
4. S. Sharma and B. G. Pollet, *J. Power Sources*, **208**, 96 (2012).
5. W. Wang, Q. Luo, B. Li, X. Wei, L. Li and Z. Yang, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 970 (2013).
6. M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel and D. Stolten, *Int. J. Hydrogen Energy*, **38**, 4901 (2013).
7. J. G. Hong, B. Zhang, S. Glabman, N. Uzal, X. Dou, H. Zhang, X. Wei and Y. Chen, *J. Membr. Sci.*, **486**, 71 (2015).
8. H. Strathmann, A. Grabowski and G. Eigenberger, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **52**, 10364 (2013).
9. S. Al-Amshawee, M. Y. B. M. Yunus, A. A. M. Azoddein, D. G. Hassell, I. H. Dakhil and H. A. Hasan, *Chem. Eng. J.*, **380**, 122231 (2020).
10. B. Kim, R. Kwak, H. J. Kwon, V. S. Pham, M. Kim, B. Al-Anzi, G. Lim and J. Han, *Sci. Rep.*, **6**, 1 (2016).
11. S. J. Kim, Y.-C. Wang, J. H. Lee, H. Jang and J. Han, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 044501 (2007).
12. S. J. Kim, S. H. Ko, R. Kwak, J. D. Posner, K. H. Kang and J. Han, *Nanoscale*, **4**, 7406 (2012).
13. A. Mani and K. M. Wang, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **52**, 509 (2020).
14. F. Roghmans, E. Evdochenko, F. Stockmeier, S. Schneider, A. Smailji, R. Tiwari, A. Mikosch, E. Karatay, A. Kühne, A. Walther, A. Mani and M. Wessling, *Adv. Mater. Interfaces*, **6**, 1801309 (2019).
15. B. Kim, S. Choi, R. Kwak and J. Han, *J. Membr. Sci.*, **524**, 280 (2017).
16. R. Kwak, G. Guan, W. K. Peng and J. Han, *Desalination*, **308**, 138 (2013).
17. S. Mikhaylin, V. Nikonenko, N. Pismenskaya, G. Pourcelly, S. Choi, H. J. Kwon, J. Han and L. Bazinet, *Desalination*, **393**, 102 (2016).
18. N. Pismenskaya, O. Rybalkina, I. Moroz, S. Mareev and V. Nikonenko, *Int. J. Mol. Sci.*, **22**, 13518 (2021).
19. V. V. Gil, M. A. Andreeva, L. Jansezian, J. Han, N. D. Pismenskaya, V. V. Nikonenko, C. Larchet and L. Dammak, *Electrochim. Acta*, **281**, 472 (2018).
20. S. Kang and R. Kwak, *Phys. Rev. Lett.*, **124**, 154502 (2020).
21. E. Korzhova, N. Pismenskaya, D. Lopatin, O. Baranov, L. Dammak and V. Nikonenko, *J. Membr. Sci.*, **500**, 161 (2016).
22. J. Balster, M. H. Yildirim, D. F. Stamatialis, R. Ibanez, R. G. H. Lammertink, V. Jordan and M. Wessling, *J. Phys. Chem. B*, **111**, 2152 (2007).
23. N. Pismenskaya, E. Pokhidnia, G. Pourcelly and V. Nikonenko, *J. Membr. Sci.*, **566**, 54 (2018).
24. E. Volodina, N. Pismenskaya, V. Nikonenko, C. Larchet and G. Pourcelly, *J. Colloid Interface Sci.*, **285**, 247 (2005).
25. M. Seo, W. Kim, H. Lee and S. J. Kim, *Desalination*, **538**, 115902 (2022).
26. Product data sheet of Ralex membrane CMHPP. Mega Group Companies Home Page. Retrieved January 5, 2023 from <https://www.mega.cz/files/datasheet/MEGA-RALEX-CMH-PP-en.pdf>
27. Nafon membrane comparison table. Fuel Cells Etc home Page. Retrieved January 5, 2023 from <https://fuelcellsetc.com/helpful-tools/nafion-membrane-comparison-table/>
28. D. V. Golubenko, B. Van der Bruggen and A. B. Yaroslavtsev, *J. Power Sources*, **511**, 230460 (2021).
29. K. Hongsirikarn, J. G. Goodwin Jr, S. Greenway and S. Creager, *J. Power Sources*, **195**, 7213 (2010).

30. A. C. Fernandes and E. A. Ticianelli, *J. Power Sources*, **193**, 547 (2009).
31. S. Sohn, I. Cho, S. Kwon, H. Lee and S. J. Kim, *Langmuir*, **34**, 7916 (2018).
32. V. V. Nikonenko, A. V. Kovalenko, M. K. Urtenov, N. D. Pismenskaya, J. Han, P. Sizat and G. Pourcelly, *Desalination*, **342**, 85 (2014).

<저자소개>

조명현

공주대학교 미래융합공학과 대학원생

최진웅

공주대학교 미래융합공학과 대학원생

김범주

공주대학교 기계자동차공학부 교수