

오염제거장치를 이용한 해양환경에서의 PEMFC의 전기화학적 성능 평가

Evaluation of Electrochemical Performance of PEMFCs with Decontamination Devices at Marine Environments

권예림¹, 유호준¹, 강병규¹, 홍기원¹, 권순기¹, 이상훈^{2,*}, 조구영^{1,*}
Ye rim Kwon¹, Ho Jun Yoo¹, Byung Gyu Kang¹, Ki Won Hong¹, Sun Ki Kwon¹, Sanghoon Lee^{2,*}, and Gu Young Cho^{1,*}

¹ 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)

² Center for Energy Research, University of California San Diego

Corresponding Authors / E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr, TEL: +82-2-8005-3520, ORCID: 0000-0002-7263-8172

E-mail: sal050@UCSD.EDU, TEL: +1 (858) 534-6527, ORCID: 0000-0002-1568-5028

KEYWORDS: Polymer electrolyte membrane fuel cell (고분자막 전해질 연료전지), Marine environments (해양환경), Electrochemical impedance spectroscopy (전기화학 임피던스 분광법), Cyclic voltammetry (순환전압전류법), Decontamination (오염제거)

In this study, we developed and evaluated a simple device for removing ionic impurities that affect the performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) in a marine environment. In such environments, PEMFCs may experience performance degradation due to the presence of Na⁺ and Cl⁻ in the air. To address this issue, the decontamination device was designed with both heating and cooling components. This device was positioned between a humidifier containing NaCl solution and a humidifier containing deionized water, both connected on the cathode side. The decontamination device effectively removed impurities (Na⁺ and Cl⁻) during experiments. As a result, the electrochemical performance of the fuel cell with the decontamination device improved compared to that of the fuel cell without it. Notably, the activation resistance and electrochemical surface area were significantly enhanced, and the ohmic resistance also improved when compared to the fuel cell without the decontamination device.

Manuscript received: September 10, 2024 / Revised: October 15, 2024 / Accepted: October 20, 2024

1. 서론

연료전지는 연료와 산소 사이의 전기화학적 반응을 이용하여 화학 에너지를 전기 에너지로 변환하는 장치이다. 이 중 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 백금을 기반으로 하는 촉매층과 고분자 전해질막을 포함한 구조로 이루어져 있다. PEMFC의 핵심 구성 요소로는 촉매층이 적용된 막 전극 집합체(Membrane Electrode Assembly, MEA), 가스켓, 분리판, 엔드플레이트, 집전판 등이 있다.

PEMFC는 주로 60-80°C의 저온 범위에서 작동하며, 수소를 연료로 사용하기 때문에 이산화탄소를 배출하지 않고, 에너지 효율이 높으며, 소음이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다[1].

이러한 장점들을 바탕으로 이동형 PEMFC 다양한 이동 수단에서도 PEMFC의 활용 범위가 점차 확대되고 있다[1-3]. 이동형 연료전지 시스템의 경우 고순도 수소가 저장 탱크로부터 공급되며, 공기는 대기로부터 블로어를 통해서 공급된다[4]. 일반적인 육상 이동형 연료전지의 경우, NO_x, SO_x, 미세먼지 등의 공기 중 불순물로 인해 연료전지의 성능이 저하될 수 있다[5,6].

선행연구와 같이 공기 중 불순물로 인한 PEMFC 성능저하가 발생하므로 PEMFC가 해양 이동형 전원으로 사용될 경우, 해양 공기 중의 이온들이 PEMFC 작동에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하다. 특히, 국제해사기구는 2030년까지 온실가스 감축을 목표로 하는 전략을 수립했으며, 한국 역시 선박, 트럭, 하역 장비 등 항만 운영과정에서 수소를 활용하여 2050 탄소중립 목표

실험에 기여 하려한다[7-9].

해양환경의 공기중에 존재하는 불순물과 이온들은 PEMFC의 공기극으로 공급되어 PEMFC 작동에 문제를 야기할 수 있다. Na^+ 의 경우 H^+ 을 대체하여 전해질막을 통과하려고 하기 때문에 전해질의 이온전도도를 저하시키고 연료전지의 오믹저항(Ohmic Resistance)을 증가시킨다. Cl는 Pt 촉매에 흡착하여 활성화반응 사이트를 감소시켜 활성화 저항 및 활성화 면적(Electrochemically Active Surface Area, ECSA)을 감소시킨다[4,10,11,12-23].

대부분의 선행연구는 NaCl 수용액을 이용해 공기극에 공급되는 공기를 가습하여 PEMFC가 해양환경에서 운전되는 상황을 모사하였다. Yoo et al.과 Uemura et al. 는 PEMFC에 공급되는 공기를 가습할 때 초음파 진동기와 NaCl 에어로졸 발생기를 사용하여 성능평가를 진행하였다[9,17] Park et al. 은 PEMFC의 작동 Voltage에 따른 평가를 진행했고, Yoo et al.은 PEMFC의 유로에 따른 성능평가를 진행하였고, Lamard et al.은 다양한 NaCl 농도에서 PEMFC를 평가했다[11,12,14]. 한편, NaCl 수용액으로 인한 PEMFC의 성능저하를 회복시키는 선행연구도 진행되었다. Lamard et al. 는 질소 퍼지를 통한 성능회복 효과를 보고하였고, MS Mikkola. et al.는 Neat Air를 이용하여 회복시키는 연구를 수행하였다[14,17].

이처럼 PEMFC를 해양환경에서 사용하기 위하여 해양 환경에서의 오염으로 인한 성능감소에 관한 연구들과 성능감소를 회복하는 방법에 관한 연구들이 진행되었다. 하지만, PEMFC 공기극의 오염을 방지하기 위한 연구는 필터를 사용하는 방법 외에 다른 연구는 미비했다[24].

본 연구에서는 PEMFC의 해양환경 운전을 모사하기 위하여 NaCl수용액을 이용해 연료전지의 공기극에 공급되는 공기를 가습 하였다. 또한, 자체 제작한 오염제거장치를 적용하여 그 효과를 평가하였다.

PEMFC의 전기화학적 성능과 특성은 Polarization Curve, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Cyclic-voltammetry를 이용하여 측정하였다. 실험이 종료된 후 공기극의 가스확산층(Gas Diffusion Layer) 표면을 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy)과 에너지분산광법(Energy Dispersion Spectroscopy)를 이용하여 분석하였다.

2. 실험방법

실험은 $22 \times 23 \text{ mm}^2$ 의 활성화 면적을 갖는 상용 막 전극 접합체 (CNL Energy, Republic of Korea, MEA C Type)를 사용하였다. 막 전극 접합체의 Nafion 은 NR211 (Chemours, USA)로 제작되었고, Ionomer는 D521 (Chemours, USA)로 제작되었다. 전극의 Pt Loading 은 Anode 와 Cathode 모두 0.4 mg/cm^2 이며 상용 가스확산층(SGL, Germany, 39BB)을 사용하였다. 분리판은 폭 1.0, 깊이 0.8 mm의 사형 유로를 가지고 있는 그라파이트 분리판을 사용하였다.

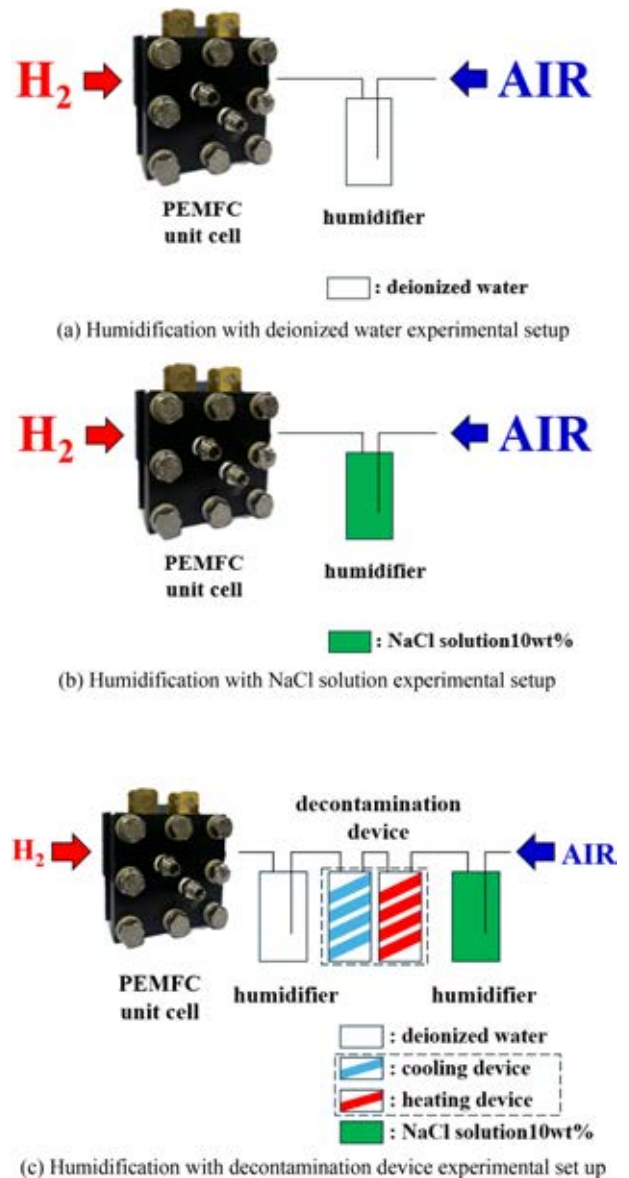


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

연료전지 특성 평가는 상온(25°C)에서 진행하였다. Fuel Cell Test Station (CNL-Station, CNL, Republic of Korea)을 사용하여 PEMFC에 가스를 공급하였다. 기체의 온도는 25°C 로 유지되었다. 수소는(99.999%, Samjung Energy, Republic of Korea) 150 kPa의 압력으로 0.1 lpm으로 가습 없이 연료극에 공급하였다. 공기는 (N_2 80 vol.%, O_2 20 vol.%, Samjung Energy, Republic of Korea) 150 kPa의 압력으로 0.5 lpm 공급하였다. NaCl 수용액으로 인한 오염 효과를 확인하기 위하여 공기는 상대습도 100으로 가습하여 공급하였다.

본 연구에서는 버블러(Bubbler) 방식의 가습장치를 활용하였다. 연료전지의 전기화학적 특성을 측정하기 위하여 상용 포텐시오스탯(sp 150, BioLogic, France)과 부스터(VMP -10)를 사용하였다. EIS는 0.8 V에서 측정하였다. Cyclic Voltammetry는 공기극에 N_2 0.2 lpm, 연료극에 H_2 0.1 lpm을 공급하여 측정하였

다. 전압 범위는 0.05-1.2 V, 속도는 50 mV·dt⁻¹로 설정하여 진행하였다. SEM 및 EDS (JSM-7600F, JEOL, Japan)를 이용하여 막 전극 접합체 표면을 분석하였다. 이온크레마토그래피(88 Basic IC Plus, Metrohm, Switzerland)분석법을 사용하여 가열장치에 포집된 내용물의 음이온 및 양이온 구성성분을 분석하였다.

Polarization Curve와 EIS를 이용하여 연료전지의 초기 성능을 확인하였다. 이후 Constant Current (0.62A/cm²) 조건에서 10 시간 동안 성능을 측정하였다. Constant Current 성능 측정 후 Polarization Curves, EIS, Cyclic Voltammetry를 측정하였다.

Figs. 1(a)는 Deionized Water를 사용하여 가습한 실험 셋업의 개략도이며, 1(b)는 NaCl solution을 사용하여 공기극을 가습한 실험 셋업 개략도이다. Fig. 1(c)는 오염제거시스템을 적용한 실험 셋업 개략도이다. 오염제거장치는 단순히 가열장치와 냉각장치의 연결로 구성되었다.

오염제거장치의 작동은 다음 설명과 같다. NaCl 수용액을 통해 가습된 25°C 공기는 50°C로 가열된 가열장치를 지나면서 공기중의 수분과 수분에 포함되어 있는 오염물질을 제거한다. 이후 가열된 건조한 공기는 냉각장치를 통과하면서 잔여 수분을 응축시키고 포함되어 있는 오염물을 제거한다. 냉각장치에 공급되는 냉각유체의 온도는 12°C로 설정하였다. 냉각장치를 지나 차가워진 건조한 공기는 다시 가습을 위해 탈이온수로 가습하였다. 탈이온수를 이용하여 가습하고 성능을 평가한 경우를 case-1 (Ref), NaCl 수용액을 이용하여 공기를 가습하고 성능을 평가한 경우를 case-2 (NC), NaCl 수용액을 사용하여 가습하고 오염제거장치를 추가한 경우를 case-3 (DC)라고 표기하였다.

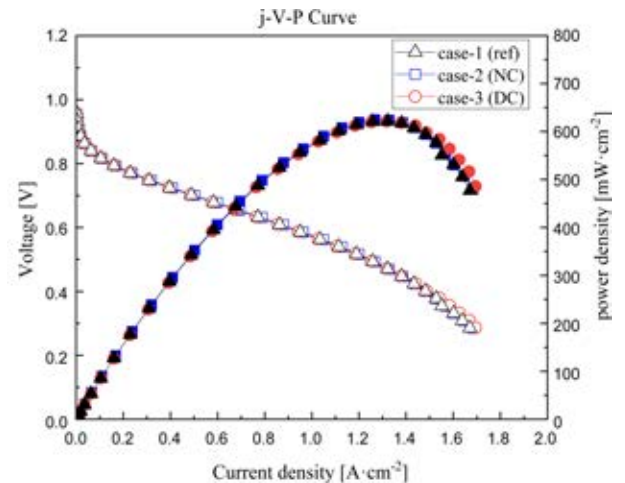
3. 결과 및 고찰

3.1 연료전지 초기 성능

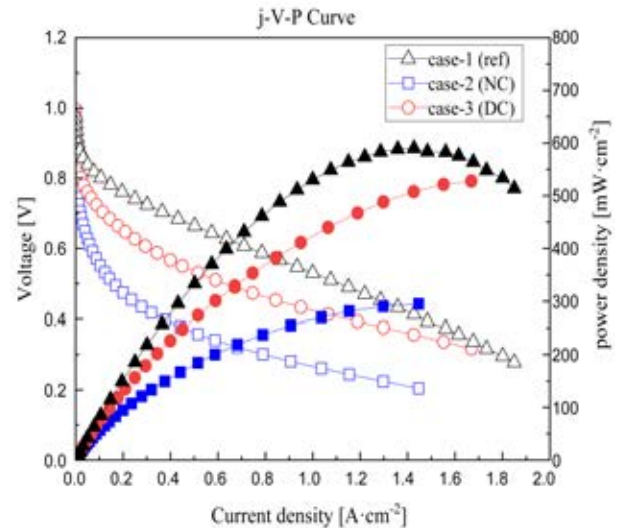
본격적인 실험을 진행하기 전 탈이온수를 이용하여 진행한 활성화 후 연료전지의 초기 성능을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 동일한 막 전극 접합체와 부품을 사용하고, 동일한 순서에 맞춰 활성화를 진행하여 성능차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. case-1 (Ref)의 성능은 622 mW/cm² 이고 case-2 (NC)의 초기성능은 625.4 mW/cm² 이며, case-3 (DC)의 초기성능은 623.3 mW/cm² 이다.

3.2 장기 성능 측정(Constant Current Mode Evaluation)

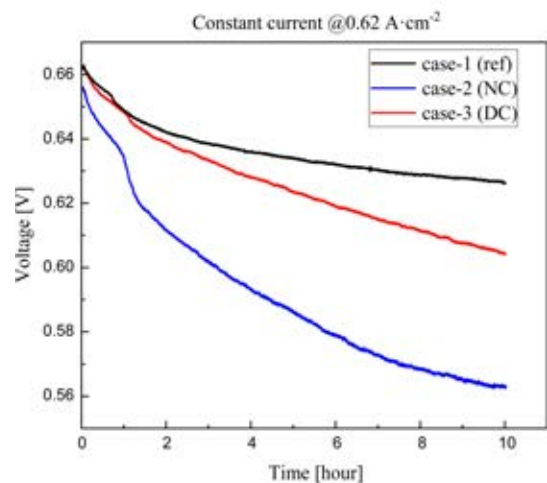
연료전지의 초기 성능을 측정한 후 0.62 A/cm²로 10시간동안 각 case의 성능을 측정하였다. 이를 통해 가습액이 연료전지의 전압에 미치는 영향을 평가하고 결과를 Fig. 2(c)에 나타내었다. Fig. 2(c)에 나온 것과 같이 탈이온수를 이용하여 공기를 가습하고 장기 성능을 측정한 case-1 (Ref)에서는 연료전지의 최초 전압이 0.66에서 0.62 V로 6% 감소하였다. NaCl 수용액을 이용하여 가습하면서 장기성능을 측정한 case-2 (NC)의 경우 연료전지의 최초 전압이 0.65에서 0.56 V로 13.8% 감소하였다. 오염



(a) j-V-P curves of the three cases measured after constant current



(b) j-V-P curves as initial performance after activation



(c) constant current at 0.62 A/cm²

Fig. 2 j-V-P curve and constant current graph

제거장치를 적용한 case-3 (DC)의 연료전지는 최초 전압이 0.66에서 0.60 V로 9% 감소하였다. case-2 (NC) 보다 오염제거장치

를 사용한 case-3 (DC) 경우 4.76 % 성능이 향상되었다.

이는 10시간 동안 연료전지의 성능을 평가하는 동안, 오염제거장치가 정상적으로 작동하여 NaCl 수용액속의 Na^+ 와 Cl^- 이온을 충분히 제거하였음을 의미한다. 공기가 NaCl 수용액이 담겨있는 가습장치를 통과하면서 Na^+ 와 Cl^- 이온을 포함한 수분이 공기와 함께 공기극에 공급되었고, 오염제거장치의 가열장치와 냉각장치를 거치면서 증발과 응축과정을 통해 오염 성분을 적절하게 제거한 것으로 추정된다.

3.3 장기 성능 평가 후 연료전지 성능

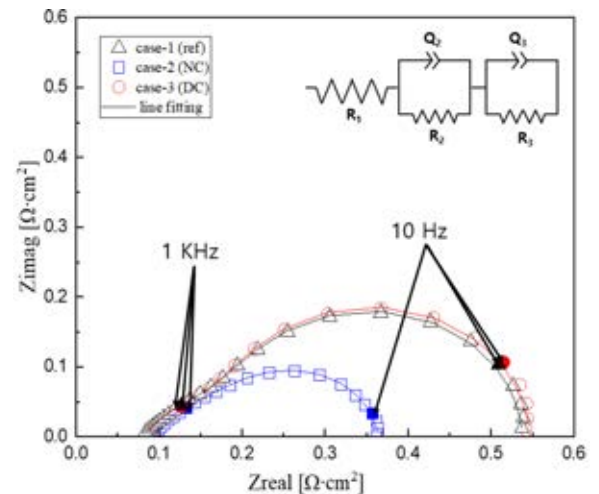
10시간 장기 성능 측정 후 연료전지의 성능을 다시 비교하였다. 각 연료전지의 분극곡선과 EIS 결과를 Figs. 2(b)와 2(c)에 나타내었다. 먼저 연료전지의 성능을 보면, 탈이온수로 평가한 연료전지 case-1 (Ref)의 경우, 10시간 Constant Current 작동 이후 성능은 590 mW/cm^2 로 5.14% 감소하였다. NaCl 수용액을 이용하여 평가한 case-2 (NC)의 성능은 295 mW/cm^2 로 52.82% 감소하였다. 오염제거장치를 적용한 case-3 (DC)의 경우 장기 성능 측정 후 성능은 527 mW/cm^2 로 최초 성능 대비 15.42% 감소하였다. 앞선 Constant Current 실험 결과와 비슷하게 오염제거장치를 적용한 연료전지의 성능감소가 NaCl 수용액을 이용하여 가습한 장치보다 개선되었다.

3.4 EIS 및 cyclic-voltammetry

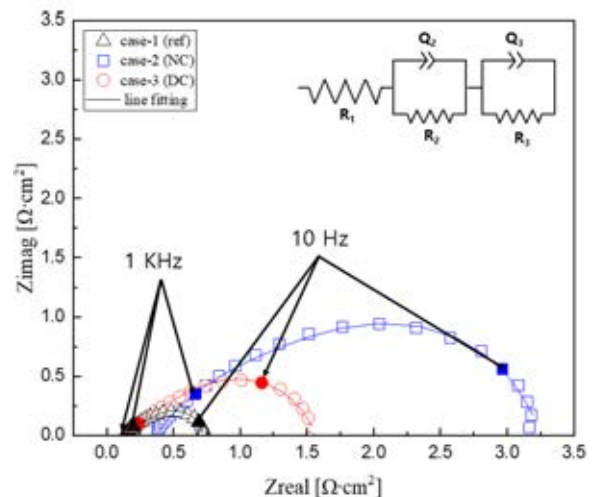
연료전지의 전기화학적 특성과 손실을 분석하기 위하여 EIS를 측정하였다. Fig. 3에 각 case의 Nyquist Plot을 나타내었다. 연료전지 저항은 활성화 저항, 오믹 저항, 그리고 물질 전달 저항 3가지로 구분된다[1]. 이 중에서 오믹저항은 Nyquist Plot의 원점에서 X축 절편인 연료전지의 EIS 결과가 시작되는 지점, 즉 고주파 영역의 시작점까지의 길이로 나타난다. 연료전지의 활성화 저항은 Nyquist Plot의 오믹저항으로부터 그려지는 반원의 크기로 나타난다[3].

Constant Current로 10 h 작동 후 측정된 Fig. 3(b)에 나타난 EIS 결과는 확연한 차이를 보였다. case-1 (Ref)의 경우 탈이온수를 이용한 평가를 진행하였기 때문에 오믹저항은 $0.13 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 활성화 저항은 $0.55 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 측정되었다. NaCl 수용액을 이용한 평가 후 연료전지인 case-2 (NC)는 오믹저항이 $0.37 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 활성화 저항이 $2.77 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 측정되었다. 오염제거장치를 장착한 case-3 (DC)는 오믹저항이 $0.15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 이고, 활성화 손실이 $1.37 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 측정되었다. NaCl로 가습한 case-2 (NC) 연료전지의 오믹저항은 case-1 (Ref) 보다 184.62% 크고, 활성화 저항은 case-1 (Ref) 보다 403.64% 크다. 오염제거장치를 사용한 case-3 (DC) 연료전지는 case-1 (Ref) 대비 오믹 저항은 15.3, 활성화 저항은 149.09% 크다.

각 연료전지의 초기 성능 측정 시 EIS 결과를 나타낸 Fig. 3(a)의 결과와 비교하면 10시간 운전 후 case-1 (Ref)는 오믹 저항은 38.46, 활성화 저항은 16.36% 증가하였고, case-2 (NC) 연료전지는 오믹저항은 75.67, 활성화 저항은 90.25% 증가하였다.



(a) EIS Nyquist plot at 0.8V before the constant current evaluation



(b) EIS Nyquist plot at 0.8V after the constant current evaluation

Fig. 3 EIS graph

오염제거 장치를 장착한 case-3 (DC)의 오믹저항은 46.66 %, 활성화 저항은 66.42 % 증가하였다.

NaCl로 인한 연료전지 성능저하 원인을 파악하기 위하여 ECSA를 측정하였다. Cyclic Voltammetry 방법을 이용하였고, 결과는 Figs. 4(a)와 4(b)에 나타내었다. 10시간 운전 후 각 연료전지의 ECSA는 case-1 (Ref)는 $4.40476 \text{E-}09$, case-2 (NC) 연료전지는 $3.69048 \text{E-}09$, case-3 (DC) 연료전지는 $3.90476 \text{E-}09 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 측정되었다. 즉, NaCl 수용액으로 가습을 하면서 운전한 case-2 (NC)의 경우 탈이온수로 가습하면서 운전한 case-1 (Ref)와 비교하여 연료전지의 활성화 면적이 16.22% 적다는 것을 나타낸다. 이는 Fig. 3(b)의 각 연료전지의 EIS 결과와도 유사하다. NaCl 수용액을 이용하여 가습한 case-2 (NC)의 활성화 저항이 다른 case의 연료전지와 비교하여 월등하게 증가하였다.

앞에서도 언급한 선행연구 결과처럼, NaCl 수용액을 이용한 가습상황에서 운전할 때 반응면적인 Pt에 Cl가 흡착되면서 활성화 면적이 감소하고, 활성화 저항은 증가한 것으로 추정할 수

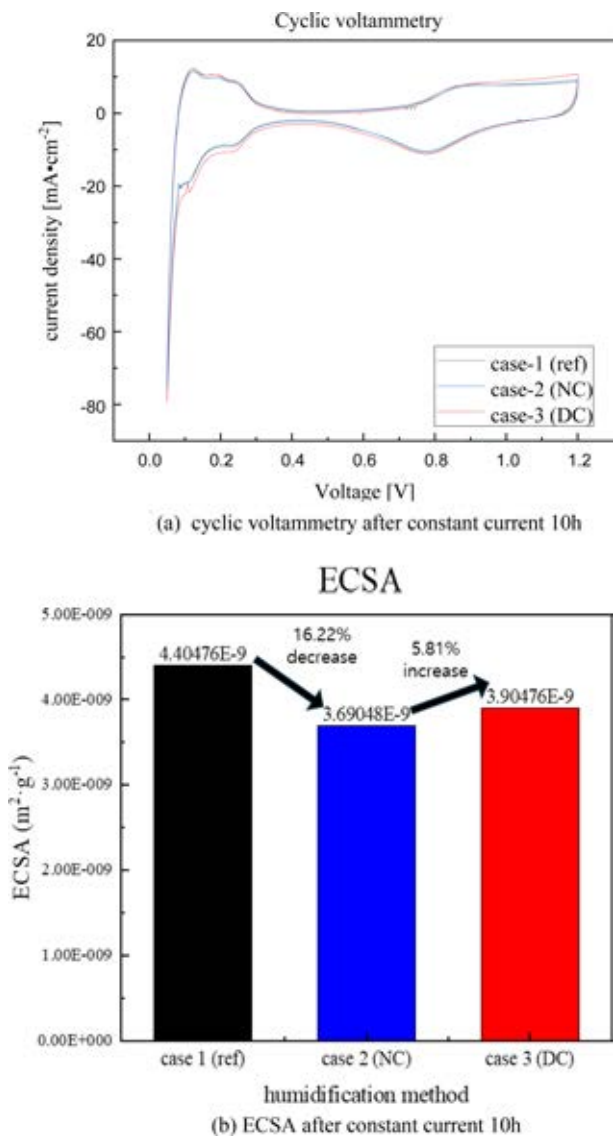


Fig. 4 Cyclic voltammetry after constant current 10h and ECSA

있다[16,20-22]. 또한, 다른 선행연구에서는 Na⁺ 이 전해질을 통한 양성자 이온의 이동을 대체하여 전해질을 통과하면서 연료 전지의 이온전도도를 감소시키고, 옴저항을 증가시킨다고 보고되었다[9,17]. Xiaofei Wen은 Element Distribution Curve 방법을 통한 MEAS의 단면 분석을 통해 Na⁺ 원소 분포 곡선이 F 원소의 분포 곡선과 유사하고 Cl⁻ 은 pt의 곡선과 유사한 분포 경향을 나타내는 것을 보고하였다[13].

3.5 분석

case-2 (NC) 연료전지의 실험 후 GDL을 이용하여 SEM과 EDS 분석을 실시하였다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 SEM 분석 결과 GDL 표면에서 NaCl 결정을 관찰할 수 있었다. 이는 NaCl 수용액을 이용한 가습 상황(case-2 (NC))에서 가습기를 통해서 NaCl이 포함된 수증기가 연료전지로 잘 공급되었다는 것을 의미한다. 또한 Table 3에는 Cathode Side GDL에서의 EDS 결과를

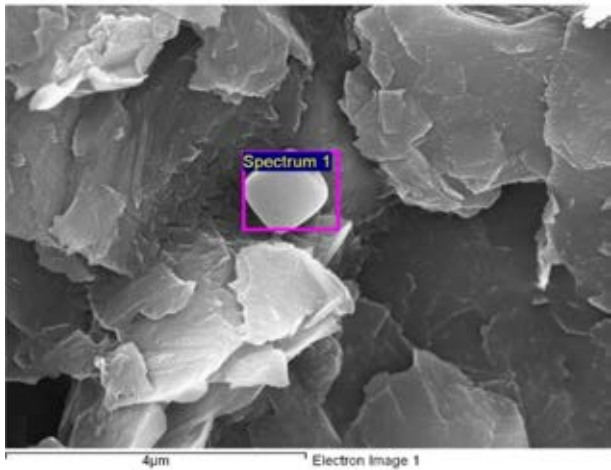


Fig. 5 SEM of cathode side GDL

Table 1 Ion mass in the air in the cooling device and heating device, obtained by Ion chromatography

Element	Cl ⁻ [mg/kg]	Na ⁺ [mg/kg]
in the cooling device	138	96
in the heating device	56	30

Table 2 EDS of cathode side GDL

Element	Weight [%]	Atomic [%]
C K	84.24	91.92
F K	3.51	2.42
Na K	5.66	3.23
Cl K	6.59	2.44
Totals	100.00	

나타내었다. GDL의 구성성분인 탄소 이외에, Na⁺와 Cl⁻ 이 검출되었다.

가열장치와 냉각장치로 구성되어 있는 오염제거장치가 적절하게 작동되었는지 확인하기 위하여 각 오염제거 장치의 내부 공기에 대하여 이온크로마토그래피(Ionchromatography) 분석을 실시하였다. Table 1의 이온크로마토그래피 결과를 통해 확인할 수 있다. 냉각장치 내부의 공기에서는 Cl⁻ 가 138, Na⁺가 96 mg/kg 검출되었으며, 가열장치에서 포집된 공기에서는 Cl⁻ 가 56, Na⁺ 30 mg/kg검출되었다.

4. 결론

본 연구에서는 해양환경의 대기 중 존재하는 Na⁺, Cl⁻ 과 같은 이온이 PEMFC의 성능에 미치는 부정적인 영향을 최소화할 수 있는 효과적인 방안을 제시하였다. 해양환경의 대기에 포함되어 있는 Na⁺와 Cl⁻는 각각 연료전지의 옴저항과 활성화 저항을 증가시키며, 성능을 감소시키는 것을 확인하였다.

10시간의 Constant Current 평가를 통해서 NaCl 수용액을 이용한 가습이 연료전지의 성능에 치명적인 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 또한, 간단한 가열장치와 냉각장치를 결합하여 제작한 오염제거장치를 장착하는 경우인 case-3 (DC) 그리고 NaCl 수용액을 이용한 경우인 case-2 (NC)보다 나은 성능을 보였다.

오염제거장치가 장착된 연료전지의 성능은 NaCl 수용액을 이용하여 가습한 경우보다 개선된 성능을 보였다.

본 연구는 해양 환경에서 PEMFC의 안정적인 운영을 위한 효과적인 예방 방법을 제공하여, 해양환경에서의 연료전지 작동과 관련한 의미 있는 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00213741). 이 논문은 2024년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0017120, 2024년 산업혁신인재성장지원사업). 이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030030260, 항공용 모빌리티를 위한 연료전지 경량화 기술 개발).

REFERENCES

- O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016), Fuel cell fundamentals, John Wiley & Sons.
- Wang, Y., Pang, Y., Xu, H., Martinez, A., Chen, K. S., (2022), PEM Fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development - A review, *Energy & Environmental Science*, 15(6), 2288-2328.
- Jang, G.-E., Cho, G.-Y., (2022), Effects of Ag current collecting layer fabricated by sputter for 3D-printed polymer bipolar plate of ultra-light polymer electrolyte membrane fuel cells, *Sustainability*, 14(5), 2997.
- Yoo, H. J., Jang, G. E., Lee, Y. J., Song, D. K., Lee, H., Cho, J. Y., (2022), Analysis of electrochemical behavior of PEMFC humidified with NaCl Solution mist using an ultrasonic vibrator, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(12), 939-946.
- Jing, F., Hou, M., Shi, W., Yu, H., Ming, P., Yi, B., (2007), The effect of ambient contamination on PEMFC performance, *Journal of Power Sources*, 166(1), 172-176.
- Nagahara, Y., Sugawara, S., Shinohara, K., (2008), The impact of air contaminants on PEMFC performance and durability, *Journal of Power Sources*, 182(2), 422-428.
- International Maritime Organization (IMO), (2018), Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, (Report No. MEPC.304(72)). [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf)
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), (2021), 2050 Carbon neutrality roadmap for the oceans and fisheries sector. <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=44586&listUpdtDt=2024-12-26++10%3A00&menuSeq=1065&bbsSeq=84>
- Finlayson-Pitts, B. J., Hemminger, J. C., (2000), Physical chemistry of airborne sea salt particles and their components, *The Journal of Physical Chemistry A*, 104(49), 11463-11477.
- Yoo, H. J., Cho, G. Y., (2022), Effects of humidification with NaCl solution mist on electrochemical characteristics of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Sustainability*, 14(23), 16242.
- Yoo, H. J., Cho, G. Y., (2023), Influences of flow channel on electrochemical characteristics of polymer electrolyte fuel cells humidified with NaCl contained H₂O, *Sustainability*, 15(3), 2415.
- Park, S., Shorova, D., Kim, H., (2022), Effect of operating cell voltage on the NaCl poisoning mechanism in polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 538, 231590.
- Wen, X., Zhu, D., Hnydiuk-Stefan, A., Ma, Z., Królczyk, G., Li, Z., (2024), Energy storage performance of hydrogen fuel cells operating in a marine salt spray environment using experimental evaluation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 213-225.
- Lamard, M., Auvity, B., Buttin, P., Rosini, S., Retière, C., (2023), Impact of NaCl Spray on the durability of PEMFC single cells and stacks in marine environment, *Journal of The Electrochemical Society*, 170(2), 024504.
- Sasank, B. V., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K. S., (2016), Performance analysis of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack operated under marine environmental conditions, *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), 471-478.
- Uemura, S., Yamazaki, M., Yoshida, T., Jao, T.-C., Hirai, S., (2017), Performance degradation of PEMFC by sea salt aerosol contamination, *ECS Meeting Abstracts*, 80(8), 651.
- Mikkola, M. S., Rockward, T., Uribe, F. A., Pivovar, B. S., (2007), The effect of NaCl in the cathode air stream on PEMFC performance, *Fuel Cells*, 7(2), 153-158.
- Madhav, D., Shao, C., Mus, J., Buyschaert, F., Vandeginste, V., (2023), The effect of salty environments on the degradation behavior and mechanical properties of nafion membranes, *Energies*, 16(5), 2256.
- Nagahara, Y., Sugawara, S., Shinohara, K., (2008), The impact of air contaminants on PEMFC performance and durability, *Journal of Power Sources*, 182(2), 422-428.
- Unnikrishnan, A., Janardhanan, V. M., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K. S., (2018), Chlorine-contaminated anode and cathode PEMFC-recovery perspective, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 22(7), 2107-2113.

21. Uddin, M. A., Wang, X., Qi, J., Ozdemir, M. O., Pasaogullari, U., Bonville, L., Molter, T., (2015), Effect of chloride on pefcs in presence of various cations, Journal of The Electrochemical Society, 162(4), F373-F379.
22. Baturina, O. A., Epshteyn, A., Northrup, P. A., Swider-Lyons, K. E., (2011), Insights into PEMFC performance degradation from HCl in Air, Journal of The Electrochemical Society, 158(10), B1198.
23. Zhang, G., Yang, G., Li, S., Shen, Q., Jiang, Z., Li, Z., Wang, H., Liao, J., Zhang, H., (2022), Molecular dynamics study on the impacts of cations in sea salt aerosol on transport performance of Nafion Membranes for PEMFCs in marine application, International Journal of Hydrogen Energy, 47(63), 27139-27149.
24. Özyalcin, C., Mauermann, P., Dirkes, S., Thiele, P., Sterlepper, S., Pischinger, S., (2021), Investigation of filtration phenomena of air pollutants on cathode air filters for PEM fuel cells, Catalysts, 11(11), 1339.

**Ye rim Kwon**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte fuel cells.

E-mail: d72230125@dankook.ac.kr

**Ho Jun Yoo**

a doctoral program in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of solid oxide fuel cells.

E-mail: dku72220126@dankook.ac.kr

**Byung Gyu Kang**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: dku72240129@dankook.ac.kr

**Ki Won Hong**

Under graduated student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: 32194950@dankook.ac.kr

**Sun Ki Kwon**

Under graduated student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: 32180262@dankook.ac.kr

**Sang Hoon Lee**

Post Doctoral researcher in the Center for Energy Research, University of California, San Diego. He received his Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University. His research interests are fuel cells, and thin films.

E-mail: sal050@UCSD.EDU

**Gu Young Cho**

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. He received his Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University. His research interests are fabrication and characterization of fuel cells, deposition and characterization of thin films.

E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr