Korean Chem. Eng. Res., 61(1), 19-25 (2023)
https://doi.org/10.9713/kcer.2023.61.1.19
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

PEM 수전해에서 막과 전극의 내구성에 미치는 구동 온도의 영향

유동근 · 김성민 · 황병찬 · 오소형 · 박권필†

순천대학교 화학공학과
57922 전남 순천시 매곡동 315
(2022년 5월 4일 접수, 2022년 7월 4일 수정본 접수, 2022년 7월 14일 채택)

Effect of Operation Temperature on the Durability of Membrane and Electrodes in PEM Water Electrolysis

Donggeun Yoo, Seongmin Kim, Byungchan Hwang, Sohyeong Oh and Kwonpil Park†

Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam, 57922, Korea
(Received 4 May 2022; Received in revised from 4 July 2022; Accepted 14 July 2022)

요 약

PEM (Proton Exchange Membrane) 수전해의 성능향상에 대해 많은 연구개발이 진행되었으나, 내구성에 대한 연구는 아직 초기 단계라고 할 수 있다. 본 연구는 성능향상을 위해 PEM 수전해 구동 온도를 상승시켰을 때, 수전해 내구성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 50~80 ℃ 온도 범위에서 일정 전류 조건으로 구동하면서 전압변화, I-V, CV (Cyclic Voltammetry), LSV (Linear Sweep Voltammetry), Impedance, FER (Fluoride Emission Rate) 등을 측정했다. 운전온도가 상승할수록 열화속도가 증가했다. 50~65 ℃에서는 IrO_2 전극 촉매 열화가 PEM 수전해 셀의 내구성에 주로 영향을 주었다. 80 ℃에서는 고분자 막과 전극 열화가 비슷하게 진행되어 short 저항이 1.0 kΩ·cm^2 이하로 감소하면서 shorting 현상에 의해 구동한지 144시간 만에 성능이 초기의 약 1/3로 감소하였다.

Abstract – Although a lot of research and development has been conducted on the performance improvement of PEM (Proton Exchange Membrane) water electrolysis, the research on durability is still in early stage. This study investigated effect of temperature on the water electrolysis durability when driving temperature of the PEM water electrolysis was increased to improve performance. Voltage change, I-V, CV (Cyclic Voltammetry), LSV (Linear Sweep Voltammetry), Impedance, and FER (Fluoride Emission Rate) were measured while driving under a constant current condition in a temperature range of 50~80 ℃. As the operating temperature increased, the degradation rate increased. At 50~65 ℃, the degradation of the IrO_2 electrocatalyst mainly affected the durability of the PEM water electrolysis cell. At 80 ℃, the polymer membrane and electrode degradation proceeded similarly, and the short resistance decreased to 1.0 kΩ·cm^2 or less, and the performance decreased to about 1/3 of the initial stage after 144 hours of operation due to the shorting phenomenon.

Key words: PEM water electrolysis, Degradation, Durability, Temperature, Membrane, Electrode

1. 서 론

수소 에너지 시대를 준비하고 있는 단계에서 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 수전해(Water Electrolysis) 방법이 국내외에서 주목받고 있다. 유럽에서는 신재생에너지인 태양광과 풍력발전의 대용량 잉여 전기를 장기간 저장하는 방법으로 수전해 방법이 제일 적합한 방법으로 보고, 수전해 방법이 활발히 연구개발 되어 실증단계에 이르렀다[1].

여러 수전해 방법 중에 PEM 수전해는 양성자 교환 막을 사용해 물을 전기 분해하여 산화극에서는 산소가 발생하고, 환원극에서는 수소가 발생한다. PEM 수전해는 과불소슬폰산(Perfluorosulfonic Acid, PFSA)으로 대표되는 양이온 교환 고분자 막을 사용하는 점에서 PEM 연료전지와 유사하다. PFSA 막의 낮은 가스 투과도와 높은 이온전도도, 고압 구동의 장점으로 인해 PEM 수전해의 컴팩트 디자인, 높은 전류밀도(> 2 A/cm^2), 높은 효율, 빠른 응답이 가능하게 되었다[2-6]. 그러나 PEM 수전해와 유사한 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 내구성이 낮은 문제점이 시장 확산에 장애가 되고 있다. PEMFC 내구성에 제일 많은 영향을 주는 요소는 고분자 막과 전극이다. 고분

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: parkkp@scnu.ac.kr
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.

자 막은 라디칼에 의한 전기화학적 열화와 수축/팽창에 의한 기계적 열화가 내구성 감소의 주원인이고[7,8], 전극은 전극 촉매의 용해와 입자 성장에 의한 활성 면적 감소가 내구성 감소의 주 원인이다[9,10]. PEM 수전해도 PEMFC와 같은 고분자 막을 사용하고 환원극의 Pt/C 전극 촉매도 동일하며, 반응 방향은 반대이지만 비슷한 원인이 내구성 약화에 영향을 준다고 본다. PEM 수전해는 구동이나 정지 시에도 젖은 상태로 계속 유지되므로 건조/가습에 의한 수축/팽창이 없어 기계적 내구성 감소는 고려하지 않아도 되지만 전기화학적 열화에서는 라디칼이 고분자 막을 열화시키는 점[11-13]은 동일하다고 할 수 있다. PEMFC에서 고분자 막 열화 속도가 높은 조건은 고전압, 저가습, 고온, 고압가스 조건이므로, PEM 수전해는 구동 조건이 PEMFC에 비해 고전압, 고압가스 조건이 막 내구성을 약화시킬 수 있는 조건이다. PEMFC에서 전극 촉매 열화 속도가 높은 조건은 고전압, 고가습, 고온, 전압변화 조건인데, PEM 수전해는 구동 조건이 PEMFC에 비해 고전압, 고가습 조건이므로 전극 내구성을 약화시킬 수 있는 구동환경이다[14].

PEM 수전해 구동 온도 범위는 일반적으로 50~80 ℃로 알려져 있다[2,3]. 구동 온도가 높아지면 막의 이온전도도가 증가하고 전극의 반응속도가 높아져서 성능이 향상되지만, 전극과 막의 열화 반응속도도 높아져서 내구성이 감소할 수 있다. 현재 PEM 수전해에 관한 많은 연구가 진행되고 있지만, 내구성에 관한 연구가 PEMFC에 비해 부족한 실정이다. 본 연구에서는 50~80 ℃ 범위에서 구동 온도가 고분자 막과 전극 촉매의 내구성에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

2. 실 험

2-1. PEM 수전해 실험

산화극은 IrO_2를 환원극은 Pt/C 전극 촉매를 사용해서 스프레이 방법으로 Nafion 212 양이온 교환 막에 접합해 제조한 막전극합체(Membrane Electrode Asembly, MEA, CNL Energy Co., Korea)를 수전해 셀에 체결하여 실험했다. Ti 소재로 만든 분리판에 물질확산을 위한 다공성 티타늄 층(PTL)과 가스 확산층(GDL)를 사용한 수전해 셀(CNL Energy Co., Korea)의 Anode에 증류수가 일정한 유속으로 공급되게 펌프와 연결하였다. 셀의 온도를 일정하게 제어한 상태에서 일정 전류를 공급하고 전압 변화를 측정하는 Power supply (Sorensen, DCS20-60E, U.S.A.)에 의해 수전해 MEA를 활성화하고 I-V 성능을 측정하였다. 일정 온도와 일정 전류에서 수전해 셀의 전압변화를 측정하면서 24시간마다 I-V 성능, Impedance을 측정하고 PEMFC 조건에서 CV, LSV를 측정해 전극과 고분자막의 열화(Degradation)를 분석하였다.

2-2. 평가 및 분석

수소투과전류밀도(Hydrogen Crossover Current Density, HCCD)는 연료전지 스테이션에서 Potentiostat (Solatron, SI 1287)을 이용한 LSV 방법으로 측정해 비교하였다. LSV는 60 ℃ RH 100%에서 cathode와 anode에 각각 수소(40 mL/min)와 질소(200 mL/min)를 공급하고, scan rate는 1 mV/sec로 0~0.4 V 범위에서 전압을 변화시키면서 전류를 측정하였다[7]. Short 저항(SR)은 NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 SR 계산법을 이용했는데, LSV에서 0.4~0.5 V 사이 직선 기울기의 역수를 취해 구했다.

전극활성면적(Electrochemical Surface Area, ECSA)은 Potentiostat을 이용한 CV 방법으로 측정하였다. CV는 LSV와 동일하게 온도 및 습도를 조절하고 가스를 주입하여, scan rate는 30 mV/s로 전압을 변화시키면서 전류를 측정하는데, 14 cycle 후 측정한 값을 택했다. IrO_2 전극과 Pt/C 전극의 CV를 가스를 교환하면서 각각 측정해 ECSA를 산출했다.

고분자 막 열화속도를 FER로 확인하였는데, 수전해 구동과정 중에 순환 증류수를 채취하여 TISAB (Total Ionic Strength Adjuster Buffer) 용액과 1:1 비율로 혼합한 후 ISE Meter (Ion Selective Electrode Meter, PH-250L, ISTEK, Inc.)로 불소 이온 농도를 분석하였다.

열화된 MEA 단면과 고분자막의 성분분석은 SEM-EDS (Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, JSM-7100F, JEOL)를 통해 관찰하였다. Au 코팅으로 15 mA에서 120초 진행하였으며, beam 전위는 5~15 kV 범위에서 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. I-V 성능 및 전압 변화

각 온도에서 PEM 수전해 I-V 성능을 Fig. 1에 비교했다. 온도가 상승할수록 같은 전압에서 전류밀도가 높아 성능이 증가함을 볼 수 있다. 온도가 상승하면 동일한 전압에서 전극의 산화/환원 반응속도가 높아지고 고분자 막의 이온전도도가 높아지기 때문이다. 그러나 온도가 상승하면 전극과 고분자 막의 열화속도도 증가할 가능성이 높기 때문에 성능과 내구성을 모두 고려한 최적의 온도에서 수전해를 구동하는 것이 중요하다.

각 온도에서 일정 전류(초기 1.8 V의 전류)로 구동하는 과정에서 전압 변화를 Fig. 2에 나타냈다. 시간이 경과 하면서 전압이 증가해 MEA 열화에 의한 성능 감소를 볼 수 있고, 온도가 높을수록 전압 변화 속도가 증가해 MEA 내구성의 온도 의존도가 높음을 보였다. 24시간 또는 48시간 구동 후마다 I-V, CV, LSV 등을 측정하고 다시 구동하였을 때 전압이 감소해서 MEA 성능 및 특성 분석과정이 MEA 활성화 효과가 있음을 확인했다. 특히 CV 과정에서 PEM 연료전지와 같이 전압 변화 사이클에 의해 활성화 가능성이 높다고

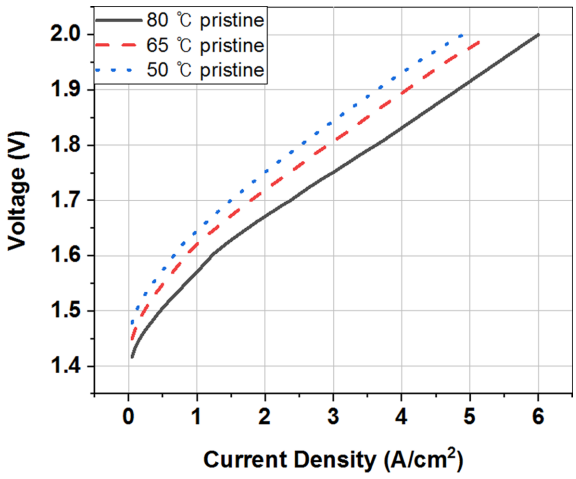

Fig. 1. Comparison of I-V performances according to operation temperature.

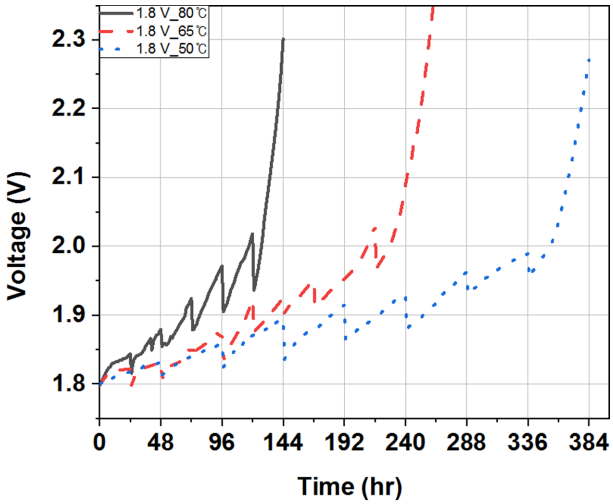

Fig. 2. Variation of voltage during constant current operation as a function of temperature.

생각한다[15]. 활성화 효과에 의해 일부 MEA 열화가 가역적으로 회복되었지만, 회복되지 않은 비가역 열화가 누적되어 내구 평가 시작 전압이 1.95 V 이상이 되면 모든 온도에서 전압이 급속히 상승했다. 2.0 V 이상에서는 전압상승 기울기가 세 온도에서 모두 거의 같아서 이때는 MEA 열화가 온도보다 전압의 영향을 주로 받음을 보였다. 전압이 2.3 V에 도달하는 시간을 기준으로 했을 때 50 ℃ 구동 온도보다 80 ℃ 구동 온도에서 MEA 열화 속도가 2.7배 높았다.

Fig. 3(a)에 65 ℃ 구동 조건에서 I-V 성능 변화를 나타냈고, Fig. 3(b)는 각 온도의 I-V 성능 그래프에서 2.0 V의 전류밀도 변화를 비교한 것이다. 전체적으로 온도가 낮을수록 전류밀도 감소가 서서히 진행됨을 볼 수 있다. 48시간까지 세 온도에서 전류밀도가 거의 같다가 이후 65 ℃와 80 ℃에서 성능 감소가 50 ℃와 차이가 나고, 72시간 후에는 65 ℃와 80 ℃에서도 차이가 발생했다. 고분자 막과 전극 열화는 고전압, 고온에서 더 빠르게 진행되는데[16], 처음 1.8 V의 전압에서 50~80 ℃ 온도 차이는 큰 영향을 주지 않았으나 전압이 올라가면서 온도 차이가 상승 효과를 줘서 열화 속도의 차이를 증가시켰다.

3-2. 전극 열화

IrO_2 전극의 CV와 각 온도에서 IrO_2 ECSA 변화를 Fig. 4에 나타냈다. 각 온도별 내구평가 과정에서 IrO_2의 CV 그래프는 Fig. 4(a)와

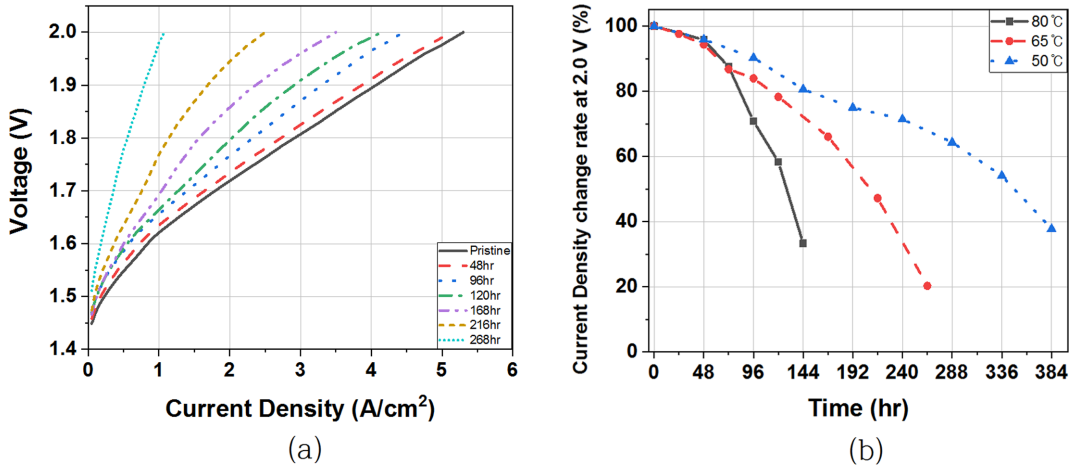

Fig. 3. Change of I-V performance (a)variation of polarization curve at 65 ℃ (b) decrease (%) of current densities at 2.0 V according to temperature.

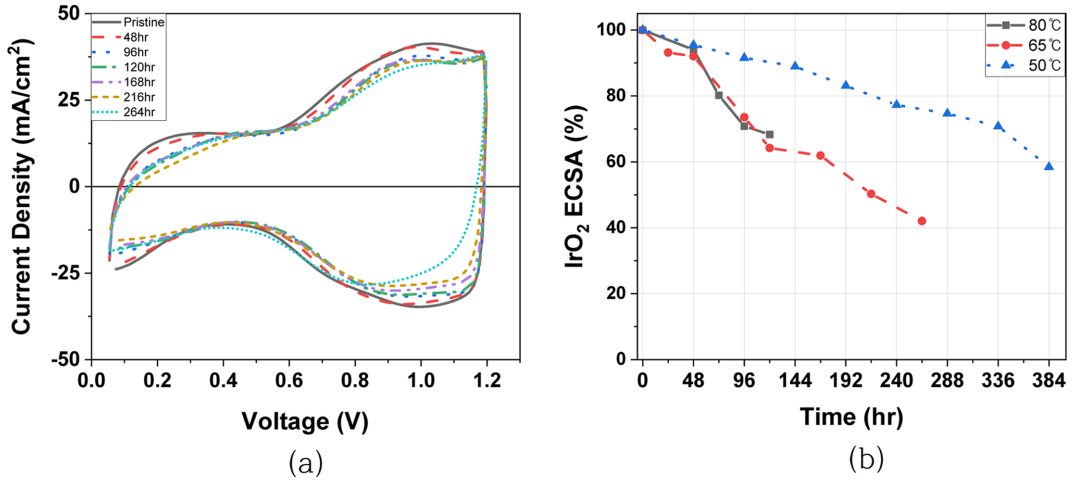

Fig. 4. Change of anode performance (a) cyclic voltammetry of IrO_2 electode at 65 ℃ (b) decrease (%) of electrochemical surface area of IrO_2 according to temperature.

같이 0~0.4 V, 0.8~0.9 V 사이의 피크가 서서히 감소하는 결과를 보였다. 0~0.4 V 피크는 수소 산화 피크이고, 0.8~0.9 V 는 Ir^{3+}/Ir^{4+} 산화환원 전이영역에 해당한다[17]. 결국 이러한 피크들의 감소는 전극 촉매의 표면적 감소의 결과이며[18], 이 중 0~0.4 V 구간의 수소 산화 피크를 이용하여 ECSA를 산출하였다(Fig. 4(b)). 50 ℃에서 IrO_2 전극 열화 속도는 65 ℃와 80 ℃ 보다 낮고, 65 ℃와 80 ℃는 비슷한 속도로 감소했다. 80 ℃에서 IrO_2 ECSA 감소는 시험 종료로 인해 초기값의 60% 이전에 중단되었다. 80 ℃에서 I-V 성능 감소가 초기의 30%까지 진행된 것을 생각하면 80 ℃에서 내구 시험 조기 종료는 IrO_2 활성면적 감소 때문만은 아니라는 것을 알 수 있다. 65 ℃에서는 IrO_2 ECSA 감소가 계속 진행되어 80 ℃보다 약 2배 더 감소할 때까지 시험이 진행되었다. 65 ℃와 50 ℃의 결과를 비교하면 I-V 성능 감소와 IrO_2 ECSA 감소 거동이 비슷해서(Fig. 2) IrO_2의 열화가 수전해 셀 성능 감소에 주로 영향을 줬다고 할 수 있다.

Fig. 5에 Pt/C 전극의 CV와 ECSA 변화를 나타냈다. 80 ℃에서 Pt/C ECSA는 144 시간 전에 약 50% 감소했는데, 급한 성능감소가 Pt의 용해에 의한 영향이 큰 것으로 보인다. 50 ℃와 65 ℃에서는 80 ℃보다 감소 속도가 작고, 50 ℃에서 65 ℃보다 ECSA가 더 감소했다. 50 ℃와 65 ℃에서 I-V 성능 감소와 Pt/C ECSA 감소 거동이 상이하다. 이와 같은 결과를 봤을 때 Pt/C 촉매의 열화가 진행되었지만, IrO_2 전극보다 수전해 셀 전체 내구성에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다.

3-3. 고분자 막 열화

고분자 막의 열화에 의한 수소투과도 변화를 Fig. 6에 비교하였다. 96 시간까지 거의 비슷하게 HCCD가 증가하다, 80 ℃의 경우 96시간 이후 HCCD가 급증했다. PEM 수전해 고분자 막의 열화는 PEM 연료전지와 같이 산소 라디칼 발생에 의한 것인데[19], 라디칼 발생 반응속도가 온도 상승에 따라 지수함수적으로 상승한 결과라고 할 수 있다. PEM 연료전지는 OCV Holding 조건에서 전기화학적 열화를 가속화 시키는데, 이때의 OCV가 1.0 V 이하로 낮지만 PEM 수전해에서는 1.5 V 이상으로 높아서 전압 면에서 라디칼 발생속도가 높은 상태이다. 산소분압도 높은 상태여서 온도만 높아지면 라디칼 발생이 충분해 80 ℃에서 고분자 막 열화도 빠르게 진행됨을 보였다.

고분자 막의 열화정도를 파악하기 위해서 PEM 수전해 구동 중 FER 변화를 Fig. 7에 비교하였다. 온도가 상승할수록 FER이 증가하였다. 80 ℃에서는 FER이 0.015 umol/cm^2·hr 이상이어서 PEMFC의

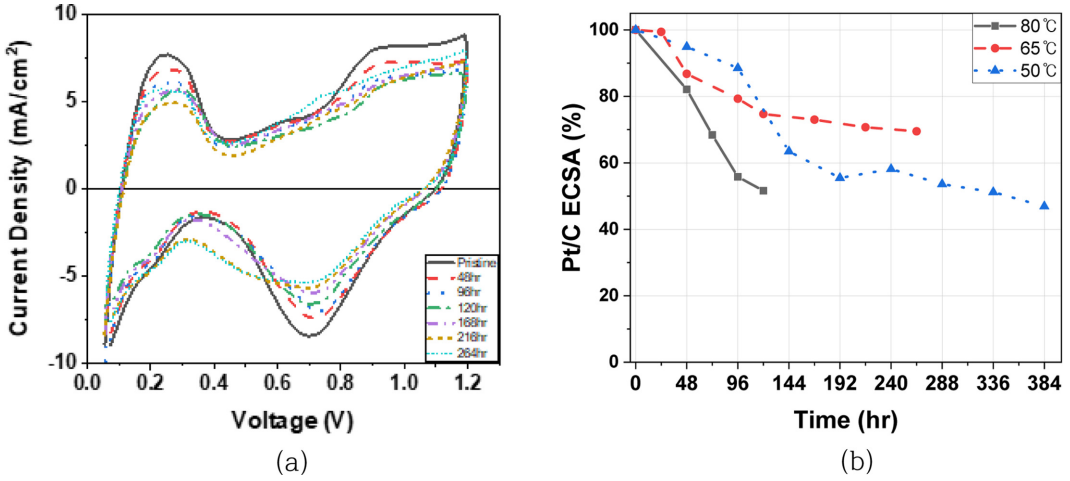

Fig. 5. Change of cathode performance (a) cyclic voltammetry of Pt/C electode at 65 ℃ (b) decrease (%) of electrochemical surface area of Pt/C according to temperature.

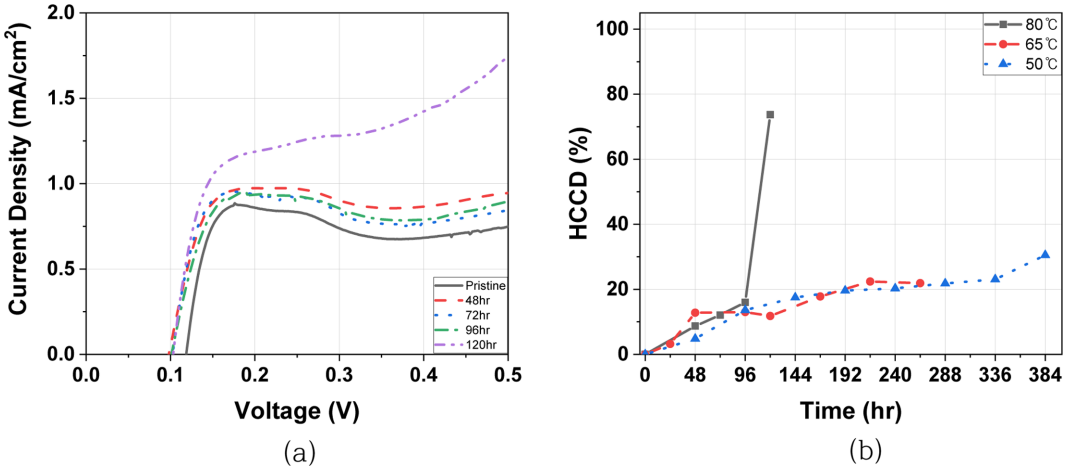

Fig. 6. Change of hydrogen cross over (a) linear sweep voltammetry at 80 ℃ (b) increase (%) of hydrogen crossover current density according to temperature.

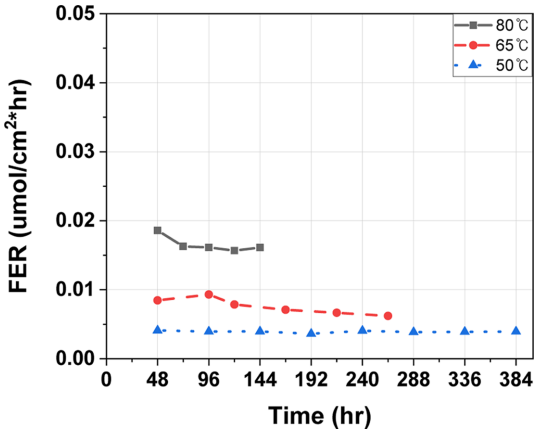

Fig. 7. Comparison of fluoride emission rate as a function of operation temperature.

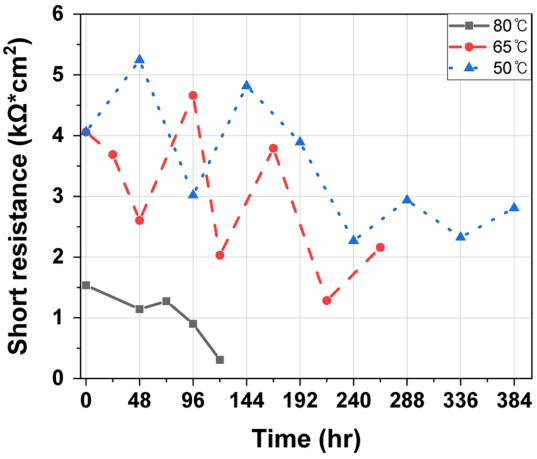

Fig. 8. Comparison of short resistance as a function of operation temperature.

OCV Holding과 같은 전기화학적 가속 열화 시 FER과 비슷한 수준이다[20,21]. HCCD가 96시간에 급증한 것은 높은 FER이 나타내듯이 막이 화학적으로 열화되면서 두께가 얇아지고 이에 따라 수소 투과도가 급증한 것이다. PEMFC에서 DOE 프로토콜에 의한 고분자 막 열화 조건이 OCV (<1.0 V), 90 ℃, H_2/Air 1.5 bar, 상대습도(RH) 30%이고, 본 연구의 PEM 수전해 조건은 >1.8 V, 50~80 ℃, H_2/O_2 1.0 bar, > RH 100%이다. 전압과 가스압 조건은 PEM 수전해 조건이 고분자막 열화 조건으로 충분하고, 온도와 가습조건이 PEM 연료전지 조건에 비해 약하다. 저가습 조건은 라디칼 발생조건보다는 고분자 막이 라디칼 공격받기 좋은 조건으로 4가지 조건 중에서 제일 영향이 작은 조건이어서 온도를 80 ℃로 높여서 라디칼 발생 속도를 증가시킨 것이 고분자 막 열화 속도(즉 FER)를 증가시킨 것이라고 판단한다.

전극과 막 열화가 모두 관여하는 단락저항(Short Resistance, SR) 변화를 Fig. 8에 비교하였다. 전체적으로 온도가 높을수록 SR이 작고, MEA 열화가 진행될수록 SR이 감소하는 경향을 보이고 있다. 50 ℃와 65 ℃에서는 SR 이 1.0 kΩ·cm^2 이상의 soft short 상태에만 있어서 SR이 MEA 열화에 영향을 주지 않았다고 본다[17]. 그러나 80 ℃ 구동조건에서는 SR이 Shorting이 발생할 수 있는 1.0 kΩ·cm^2 이하(hard short)로 감소하였다. 96 시간 이후에 hard short 상태가 되었는데 이 시점에 HCCD가 급증한 것과 연관이 있다고 판단된다. 고분자 막이 얇아지면서 HCCD가 급증하지만, 막이 얇아지면서 막 내부에 석출된 금속 입자 간의 거리도 좁혀져 양극 간의 전자이동을 원활히 해준 결과 SR이 감소한 것이다. 80 ℃에서 MEA의 성능이 급하게 감소한 것이 SR이 1.0 kΩ·cm^2 이하로 낮아진 결과라고 볼 수 있고, 또한 SR 감소는 전극과 막이 모두 열화되었을 때 발생한 것이라고 할 수 있다.

온도 80 ℃에서 구동한 MEA 단면을 SEM-EDS 분석하여 Fig. 9에

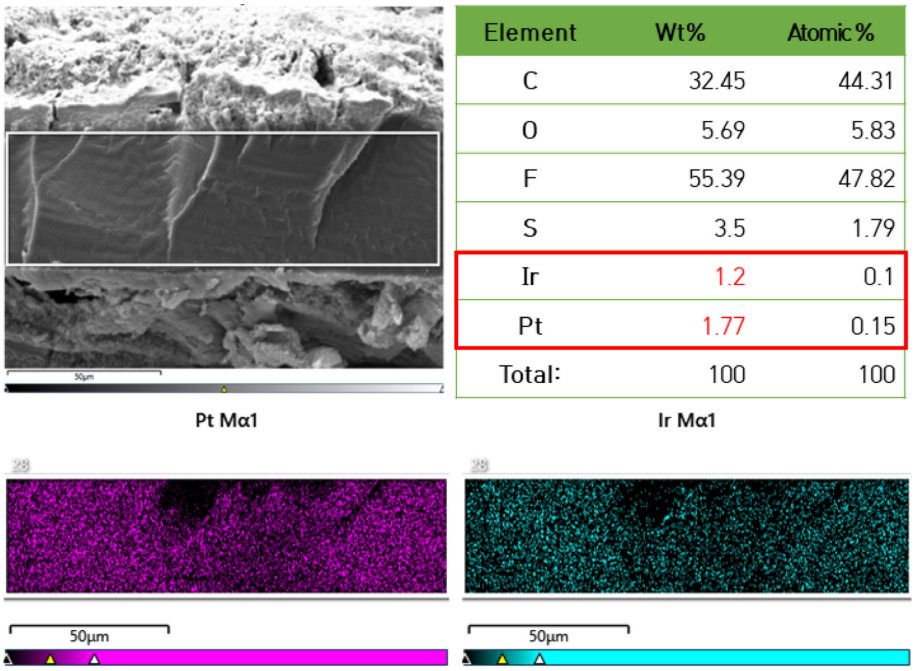

Fig. 9. SEM EDS of membrane cross section after durability test at 80 ℃.

Table 1. Components in membrane after durability test

Element (wt.%)	50 ℃	65 ℃	80 ℃
C	30.6	28.0	32.5
O	6.0	4.8	5.7
F	60.9	64.8	55.4
S	2.1	2.0	3.5
Ir	0.3	0.3	1.2
Pt	0.1	0.3	1.8
Total	100	100	100

나타냈다. 144 시간의 짧은 시간에 막 내부에 석출된 Pt와 Ir이 각각 1.77, 1.2 wt%로 많은 양이 막 전체에 분포해 있다. Table 1에 50, 65 ℃에서 구동한 MEA의 막 내부에 석출된 Pt와 Ir을 비교하였는데, 구동 온도가 상승할수록 석출된 금속 양이 증가하였다. 특히 80 ℃에서는 50 ℃보다 전체 석출된 금속 양이 7.5배 높아 SR이 1.0 kΩ·cm^2 이하로 감소해서, 수명 단축의 주 원인이 되었음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

PEM 수전해 내구성에 미치는 구동 온도의 영향을 파악하기 위해 초기 전압 1.8 V의 일정 전류로 각 온도에서 수전해를 구동하면서 MEA 성능 변화 및 열화를 분석하였다.

구동 온도가 상승할수록 MEA 열화 속도가 증가해 80 ℃ 구동 MEA 수명은 50 ℃ 구동 MEA 수명의 37.5%였다. 50 ℃와 65 ℃ 구동 조건에서는 고분자막 열화보다는 주로 전극 열화가 발생하였다. IrO_2 전극의 ECSA 감소가 크면 MEA의 I-V 성능 감소가 커서 PEM 수전해 성능과 내구성에 미치는 영향이 Pt/C 전극보다 IrO_2 전극이 큼을 보였다.

80 ℃ 구동 과정에서는 고분자 막 열화도 진행되어 수소투과도와 불소유출속도가 증가하였다. 80 ℃에서 short 저항의 급감과 함께 MEA 성능이 급감하였다. short 저항의 감소는 전극이 열화되어 Pt와 Ir이 막 내부에 석출되고, 고분자 막의 열화로 막이 얇아지면서 전극과 전극 사이를 전자가 쉽게 이동할 수 있게 된 결과라고 판단된다.

감 사

본 논문은 순천대학교 교연비 사업에 의하여 연구되었음.

References

1. Alexander, B. and Hartmut, S., "Current Status of Water Electrolysis for Energy Storage, Grid Balancing and Sector Coupling Via Power-to-gas and Power-to-liquids: A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **82**, 2440-2454(2018).
2. Ju, H. K., Badwal, S. and Giddey, S., "Comprehensive Review of Carbon and Hydrocarbon Assisted Water Electrolysis for Hydrogen Production," *Appl. Energy*, **231**(1), 502-533(2018).
3. Kumar, S. S. and Himabindu, V., "Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis–A Review," *Mater. Sci. for Energy Technol.*, **2**(3), 442-454(2019).
4. Grigoriev, S. A., Millet, P. and Fateev, V. N., "Evaluation of Carbon-supported Pt and Pd Nanoparticles for the Hydrogen Evolution Reaction in PEM Water Electrolysers," *J. Power Sources*, **177**(2), 281-285(2008).
5. Millet, P., Ngameni, R., Grigoriev, S. A., Mbemba, N., Brisset, F., Ranjbari, A. and Etiévant, C., "PEM Water Electrolyzers: From Electrocatalysis to Stack Development," *Int. J. Hydrogen Energy*, **35**(10), 5043-5052(2010).
6. Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J. and Stolten, D., "A Comprehensive Review on PEM Water Electrolysis," *Int. J. Hydrogen Energy.*, **38**(12), 4901-4934(2013).
7. Kim, T. H., Lee, J. H., Cho, G. J. and Park, K. P., "Degradation of Nafion Membrane by Oxygen Radical," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(6), 597-601(2006).
8. Lee, H., Kim, T. H., Sim, W. J., Kim, S. H., Ahn, B. K., Lim, T. W. and Park, K. P., "Pinhole Formation in PEMFC Membrane After Electrochemical Degradation and Wet/dry Cycling Test," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(2), 487-491(2011).
9. Oh, H. S., Nong, H. N., Reier, T., Bergmann, A., Gliech, M., Teschner, D. and Strasser, P., "Electrochemical Catalyst–Support Effects and Their Stabilizing Role for IrOx Nanoparticle Catalysts during the Oxygen Evolution Reaction," *J. Am. Chem. Soc.*, **138**(38), 12552-12563(2016).
10. Siracusano, S., Baglio, V., Dijk, N. Van., Merlo, L. and Aricò, A. S., "Enhanced Performance and Durability of Low Catalyst Loading PEM Water Electrolyser Based on a Short-side Chain Perfluorosulfonic Ionomer," *Appl. Energy*, **192**(15), 477-489(2017).
11. Collier, A., Wang, H., Yaun, X., Zhang, J. and Wilison, D. P., "Degradation of Polymer Electrolyte Membranes," *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**(13), 1838-1854(2006).
12. Rakousky, C., Reimer, U., Wippermann, K., Carmo, M., Lueke, W. and Stolten, D., "An Analysis of Degradation Phenomena in Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis," *J. Power Sources*, **326**(15), 120-128(2016).
13. Chandesris, M. V., Médeau, N., Guillet, S., Chelghoum, D., Thoby, F. and Fouda, O., "Membrane Degradation in PEM Water Electrolyzer: Numerical Modeling and Experimental Evidence of the Influence of Temperature and Current Density," *Int. J. Hydrogen Energy.*, **40**(3), 1353-1366(2015).
14. Oh, S. H., Lim, D. H. and Park, K. P., "Durability Evaluation of PEMFC Electrode Using Oxygen as Cathode Gas," *Korean Chem. Eng. Res.*, **59**(1), 11-15(2021).
15. Zhiani M., Maidi S., Taghiabadi M., "Comparative Study of On-Line Membrane Electrode Assembly Activation Procedures in Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *FUEL CELLS,* **13**(5), 946-955(2013).
16. Oh, S. H., Cho, W. J., Lim, D. H. Yoo, D. G. and Park, K. P., "Reducing the Test Time for Chemical Durability of PEMFC Polymer Membrane," *Korean Chem. Eng. Res.*, **59**(3), 333-338(2021).
17. Bessarabov, D., Wang, H., Li, H. and Zhao, N., "PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications," Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
18. Rasten, E., Hagen, G. and Tunold, R., "Electrocatalysis in Water Electrolysis with Solid Polymer Electrolyte," *Electrochimica Acta*, **48** 3945-3952(2003).
19. Mench, M. M., Emin, C. K. and Veziroglu, T. N., "Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation," Academic Press, Oxford, Waltham,

MA, 64-77(2012).
20. Song, J. H., Kim, S. H., Ahn, B. K., Ko, J. J. and Park, K. P., "Effect of Electrode Degradation on the Membrane Degradation in PEMFC," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(1), 68-72(2013).
21. Lee, H., Kim, T. H., Son, I. J., Lee, J. H., Lim, T. W. and Park, K. P., "Effect of Temperature on Electrochemical Degradation of Membrane in PEMFC," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(4), 441-445(2009).

Authors

Donggeun Yoo: Master's course, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; ehdrms6832@gmail.com

Seongmin Kim: Bachelor's, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; mg24420@naver.com

Byungchan Hwang: Researcher, Fuel Cell Test and Evaluation Center, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; hwangbc2009@gmail.com

Sohyeong Oh: Doctor's course, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; ohso45@naver.com

Kwonpil Park: Professor, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; parkkp@scnu.ac.kr