

알칼리막 연료전지용 전극의 제조방법에 따른 전기화학적 특성 분석

육은성^{1,2} · 이혜진¹ · 정남기^{2*} · 신동원^{1*} · 배병찬^{1,3}

¹한국에너지기술연구원 연료전지연구실

²충남대학교 에너지과학기술대학원

³과학기술연합대학원대학교 재생에너지공학

(2021년 8월 26일 접수 : 2021년 9월 23일 채택)

Electrochemical Characteristics of Electrode by Various Preparation Methods for Alkaline Membrane Fuel Cell

Eunsung Yuk^{1,2}, Hyejin Lee¹, Namgee Jung^{2*}, Dongwon Shin^{1*}, and Byungchan Bae^{1,3}

¹Fuel Cell Laboratory, Korea Institute of Energy Research (KIER), 152, Gajeong, Yuseong, Daejeon, 34129, Korea

²Graduate School of Energy Science and Technology (GEST),

Chungnam National University, 99 Daehak, Yuseong, Daejeon 34134, Korea

³Renewable Energy Engineering, University of Science & Technology (UST), 217,
Gajeong, Yuseong, Daejeon, 34113 Korea

(Received August 26, 2021 : Accepted September 23, 2021)

초 록

최근에 알칼리막연료전지의 막전극접합체에서 이오노머에 의한 촉매 피독에 대한 연구 결과들이 보고되고 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해서 전극 제조 시에 사용되는 유기용매의 성분을 조절하여 막전극접합체의 성능을 향상시키고자 하였다. Fuma-Tech사의 상용 이오노머를 사용하여 N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP)와 Ethylene glycol (EG)를 이용한 4가지의 혼합용매를 제조하였다. 혼합용매를 이용하여 제조된 캐소드 전극은 NMP기반의 상용 이오노머에 비해서 약 36%의 향상된 분극성능을 나타내었다. 이것은 용매의 종류에 따른 이오노머의 분산성 차이에 따른 결과로 추측되며 비균일성 분포의 이오노머가 전극의 성능을 향상시키는 것으로 관찰되었다. 이에 관한 원인분석을 위해서 막전극 접합체의 고주파 저항, 내부저항 보정 분극곡선, Tafel 기울기, Mass activity 및 임피던스 분광법을 사용하여 특성 분석을 실시하였다. 이오노머의 비율 증가에 따라서 캐소드 전극 성능이 개선되는 것을 확인하였고, 이것은 이오노머의 입도 분포에 따라서 촉매의 피독이 감소되는 결과로 판단된다.

Abstract : Catalyst poisoning by ionomers in membrane electrode assemblies of alkaline membrane fuel cells has been reported recently. We tried to improve the membrane electrode assembly's performance by controlling the solvent's ratio during electrode manufacturing. 4 Different mixing ratios of N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) and ethylene glycol (EG) gave four different cathode electrodes with platinum and Fuma-Tech ionomers. The electrode with higher EG

*To whom correspondence should be addressed.

*E-mail: dwshin@kier.re.kr (D.W. Shin)

njung@cnu.ac.kr (N.G. Jung)

improved polarization performance by about 36% compared to the NMP-based commercial ionomer. The dependence of the ionomer's dispersibility on the solvent seems responsible for the difference, which means that the non-uniform distribution of ionomers improves the performance of the electrode. High-frequency resistance, internal resistance corrected polarization curve, Tafel slope, mass activity, and impedance spectroscopy characterized the electrode. We can find that the existence of poor solvent improves cathode electrode performance. It seems to be the result of reduced poisoning of the catalyst according to the particle size distribution of the ionomer.

Keywords : Ionomer agglomeration, Ionomer Adsorption, Cathode Poisoning, Alkaline membrane fuel cell, Membrane electrode assembly

1. 서 론

음이온교환막을 전해질로 사용하는 알칼리막 연료 전지(AMFC, Alkaline Membrane Fuel Cell)는 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell)에 비해서 산소환원반응(Oxygen Reduction Reaction, ORR)이 매우 빠른 장점을 가지고 있다.¹⁾ 따라서 철, 니켈 등의 비귀금속 촉매의 사용이 가능하며 PEMFC에 비해서 귀금속촉매의 사용량을 저감시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, AMFC는 알칼리환경에서 작동하므로 하이드록실(OH) 음이온에 의해서 각 전극의 반응 및 전해질막에서의 이온 전달이 이루어진다. 그러나, PEMFC와 반대 방향의 물의 이동 및 CO₂에 의한 피독 등의 다양한 성능 저하 요소들이 존재하며 이에 대한 이해가 부족한 상태이다.²⁻⁶⁾

AMFC에 사용되는 고분자전해질은 대부분 강염기성의 이온기를 이용하고 있어서 전해질막과 이오노머 고분자의 주쇄 및 이온기의 분해가 쉽게 발생한다. 이러한 조건에서 효과적으로 성능을 발휘하기 위해서는 높은 화학적 안정성이 요구되며 일반적으로 내구성이 뛰어난 것으로 알려진 폴리아릴렌에테르, 폴리파라페닐렌 등의 방향족 고분자가 사용되고 있다.⁷⁾ 그러나, 최근의 연구 결과에 따르면 이러한 방향족 고분자의 이오노머는 전극층에서 촉매의 전기화학반응의 성능을 크게 저하시키는 것으로 알려졌다.⁸⁻¹³⁾ 일반적으로 이오노머의 방향족 성분 또는 OH이온전달기가 백금 촉매 표면에 흡착되어 애노드 및 캐소드의 반응을 방해한다는 연구가 보고되었다.¹⁴⁻¹⁷⁾

Los Alamos 국립연구소의 Matanovic I. 등은 이오노머의 흡착을 억제하기 위해서 주쇄 및 이온기 구조를 변경하는 방법과 합금 촉매를 사용하는 방법을 제시하였다.⁸⁻⁹⁾ 비평면 형태의 방향족 주쇄와 강직한 이온기 사슬을 도입하여 촉매 표면의 흡착을 줄이는 방법을 제시하였다. 이러한 연구 결과는 고분자의 구조를 적절히 변경하면 이오노머가 백금촉매 표면에 흡착되는 피독 문제를 완화할 수 있고, 이를 통하여 촉

매의 활성을 유지시킬 수 있는 가능성을 시사한다.

이러한 연구 결과를 응용하여 본 연구에서는 상용 이오노머를 그대로 사용하면서 촉매흡착을 억제할 수 있는 방법을 연구하였다. 동일한 구조의 이오노머의 경우에도 용매에 따른 고분자의 용해도의 차이를 이용하여 입도분포(또는 hydrodynamic volume)를 다양하게 조절할 수 있다. 이것은 고분자와 용매 사이의 용해도 상수와 밀접하게 관계가 있으며, 좋은 용매(Good solvent)와 비용매(Poor Solvent)의 비율을 적절히 활용하면 슬러리 내에서 이오노머의 입도 분포의 조절이 가능하다.¹⁸⁻¹⁹⁾ 이와 같은 원리를 이용하여 좋은 용매로 슬러리를 제조한 경우에는 이오노머가 매우 균일하게 용해되고, 반대의 경우인 비용매로 슬러리를 제조하면 불균일성의 이오노머 분포로 제어가 가능하다. 좋은 용매를 사용한 균일한 슬러리의 경우에는 이오노머가 매우 잘 용해되어 높은 부피를 차지하므로 촉매와 접촉할 가능성이 올라간다. 반대로 비용매의 양이 증가하면 이오노머는 불균일하게 응집하여 촉매와 접촉하는 확률이 줄어들 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 Fuma-Tech사의 상용 이오노머를 사용하여 슬러리의 용매 조성에 따른 막전극접합체의 전기화학적 특성 분석을 실시하였다. 좋은 용매로는 Fuma-Tech사의 이오노머의 시판 용매로 제공하는 N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP)를 선택하였고, 비용매는 알코올계열의 Ethylene glycol (EG)을 선택하였다. 비용매의 선택에 있어서 NMP와 유사한 휘발점을 가지는 용매를 선택하였다. 비점이 다른 용매를 선택한 경우에는 건조의 최종단계에서 휘발점의 차이로 인하여 슬러리의 용매 조성이 변화하여 초기에 의도한 이오노머의 입도분포가 보장될 수 없기 때문이다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 NMP 100% 이오노머 용액에 EG의 함유량을 늘린 4가지의 다른 조성의 슬러리를 이용하여 촉매층을 제조하였다. 용매 조성에 따른 정확한 비교를 위하여 EG 100%의 슬러리의 경우에도 동일하게 점도를 유지하여 전극층을 제조하였다. 4개의 다른 전극층을 환원극(캐소드)에 적용하여

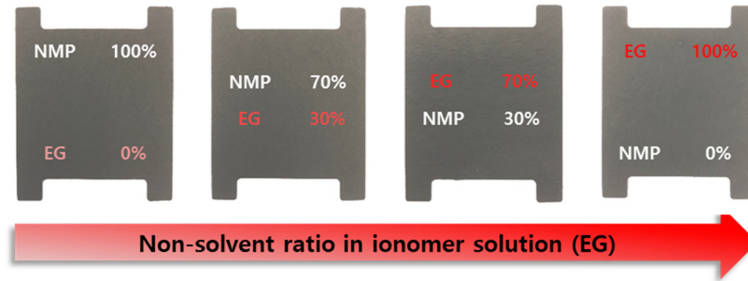


Fig. 1. Pictures of Gas Diffusion Electrode according to ratio of NMP and EG.

동일한 온도 및 습도 조건에서 다양한 전기화학적 기법을 이용하여 연료전지 MEA의 성능을 분석하고자 하였다.

2. 실험

2.1 전극 및 MEA 제조

캐소드 전극은 백금이 탄소에 담지 되어있는 상용 Pt/C 촉매(TEC10E50E, Tanaka Kikinzoku Kogyo K.K.)와 Fuma-Tech 사의 상용 음이온 교환 이오노머 용액(FAA-3-SOLUT-10, 10 wt.% NMP)를 사용하였다. 이오노머 용액은 EG (99.9%, Samchun Pure Chemicals)를 사용하여 NMP와 EG의 무게비 비율을 10:0, 7:3, 3:7, 0:10로 조절하여 4가지의 이오노머 용액을 제조하였다. 제조된 각각의 이오노머 용액과 Pt/C 촉매를 섞은 후에 혼합하여 슬러리를 제조하였다. 준비된 슬러리는 Gas diffusion layer (GDL, 39BB, SGL Carbon) 위에 코팅 후에 진공 오븐에서 80°C의 온도와 15시간 동안의 열처리를 거쳐 GDE를 완성하였다(Fig. 1). 애노드 전극의 제조시에 촉매는 PtRu/C (TEC64E51, Tanaka Kikinzoku Kogyo K.K.)를 사용하였으며 Fuma-Tech 사의 상용 음이온 교환 이오노머 용액(FAA-3-SOLUT-10, 10 wt.% NMP)과 NMP 기반의 용매를 사용하였다. 이외의 부분은 캐소드 전극의 제조 방법과 동일하다. 전해질막은 Fuma-Tech 사의 연료전지용 알칼리막(FAA-3-50)을 사용하였다. 전처리 과정은 3M NaOH 용액을 만들어 15시간 동안 전해질막과 전극 내의 고분자 말단을 OH로 충분히 치환하는 작업을 거친 후 압착하여 13.1 cm² 유효 면적의 MEA를 제조하여 평가하였다.

2.2 MEA 전기화학 특성 분석

제조된 MEA의 전기화학 특성 분석은 CNL Energy 사의 연료전지 성능 평가 장치에서 진행되었으며, 상압, 70°C 및 100% RH의 가습 환경에서 진

행되었다. MEA의 성능을 측정하기 위해 각각 애노드와 캐소드에 1000 sccm의 유량을 주입하며 전기화학 평가장치를 이용하여(EIS, HCP-803, BioLogic) 성능 평가를 진행하였다. MEA에서 캐소드 전극의 전기화학적 표면 활성 면적을 비교하기 위해 애노드에 200 sccm의 수소와 캐소드에 1000 sccm의 질소를 주입하여 순환전압전류곡선을 평가하였다. 동일 기기에서 각 전류밀도에 따른 교류주파수 응답법을 이용한 임피던스를 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 전류-전압 곡선 및 고주파 저항 분석

Fig. 1의 4가지 용매 비율에 따른 MEA의 성능을 알아보기 위해 전압-전류 곡선 및 고주파 저항(High Frequency Resistance, HFR)을 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 평가 결과 EG 비율이 0에서 100%로 증가할수록 0.6 V에서의 성능은 920에서 1250 mA/cm²까지 점진적으로 향상되었다. 이와 같은 성능은 NMP가 100%인 성능에 비해서 약 36% 증가한 성능으로서 현재 보고된 Fuma-Tech 사의 전해질막 및 이오노머를 사용하여 단위 전지를 평가한 결과 중 가장 높은 성능으로 추정된다.²⁰⁻²⁵⁾ 이러한 성능 증가의 원인은 비용매의 함량에 따른 전극층의 구조변화에 의한 것이다. HFR값은 EG함량이 증가함에 따라서 점차 감소함을 보여주었다. Fig. 2에 제시된 MEA는 모두 동일한 전해질막을 사용하였기 때문에, HFR의 변화는 촉매층 내부에서 이오노머 저항이 변화에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 이에 관한 좀 더 자세한 해석을 위하여 다양한 전기화학적 분석을 실시하였다.

3.2 iR-free 전류-전압 곡선 및 Tafel plot

Fig. 2에서 얻어진 HFR을 이용하여 iR-free I-V curve를 작성하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보인 바와 같이 EG의 함량이 증가할수록 동일한 전류

밀도에서 향상된 셀 전압을 나타내었다. NMP 100%인 시판용액을 사용하여 성능을 측정한 결과에서 가장 낮은 성능을 나타내었는데, 저전류 및 고전류밀도의 모든 영역에서 낮은 셀 전압을 나타내었다. Fig. 3(a)의 각 MEA에 대해서 과전압 0.1 V에서의 전류밀도를 Pt 담지량으로 나누어 단위 면적당의 MA (Mass Activity)를 계산하였다. 그리고 활성화분극에 의한 전압 손실을 계산하기 위하여 저전류밀도의 10-100 mA/cm² 영역에서 Tafel 기울기를 Fig. 3(b)와 Table 1에 도시하였다.

비용매 EG의 양이 증가함에 따라서 MA는 29, 31, 33, 35 A/g로 증가하여 촉매의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 유사한 경향으로 Tafel 기울기가 각각 88.3, 86.9, 83.1, 79.6 mV/decade로 감소하였다. 이와 같은 결과는 서론에서 주장한 대로 슬러리 제조시에 비용매인 EG의 함량이 증가할수록 이온노머의 백금흡착을 감소시키는 결과를 나타내는 것이다. 비용매의 함량이 증가하면 이온노머의 비균일성이 증가하여 촉매와 접촉할 가능성이 줄어든다고 추측이 된다. 다만, 개회로전압(Open Circuit Voltage, OCV)에서는 용매의 종류에 따른 효과가 크게 나타나지 않았다. 이것은 OCV가 주로 전해질막의 가스투과도에

많은 영향을 받기 때문이다.

Fig. 3에서 추측할 수 있는 다른 결과로는 100 mA/cm² 이상의 고전류밀도에서 셀 전압의 거동이다. 전류밀도가 증가할수록 EG의 함량이 70% 및 100%인 전극층이 높은 전류밀도를 나타내었다. 일반적으로 이와 같은 고전류밀도의 영역에서는 촉매층의 활성화분극보다는 반응물 및 생성물에 의한 농도분극에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 EG의 함량이 증가할수록 반응물인 산소의 공급이 매우 원활하게 이

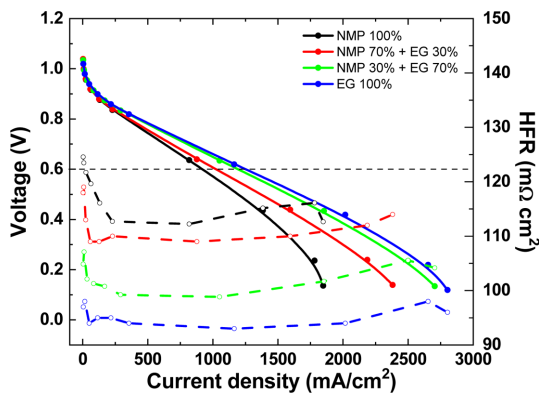


Fig. 2. Polarization curve and High Frequency Resistance of the AMFC Cell with Fuma-Tech membranes.

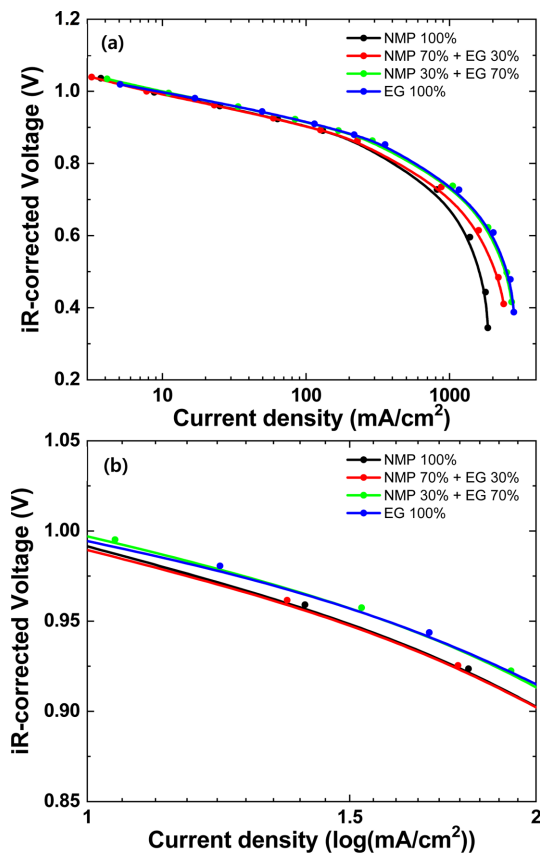


Fig. 3. (a) iR-corrected polarization curve (b) Tafel plot.

Table 1. MEA Characteristics according to the different solvent ratio for cathode

Sample name	OCV	Current density @ 0.6 V	iR-corrected current density @ 0.6 V	Tafel slope (iR-free)	Mass activity @ 0.95 V
	Voltage	mA/cm ²	mA/cm ²	-mV/decade	A/g
NMP 100%	1.04	920	1326	88.3	29
NMP 70% + EG 30%	1.04	1017	1658	86.9	31
NMP 30% + EG 70%	1.03	1190	1951	83.1	33
EG 100%	1.02	1250	2018	79.6	35

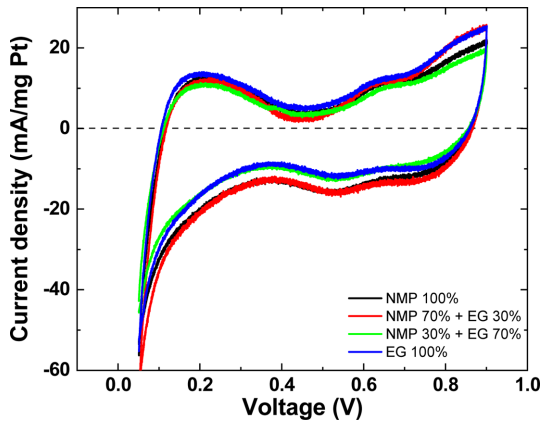


Fig. 4. Cyclic voltammogram (Working electrode: cathode).

루어졌다는 사실을 알 수 있다. 이 또한 좋은 용매 및 비용매의 관계로 설명할 수 있는데, 좋은 용매를 사용한 전극층은 매우 균일하고 높은 밀도를 가지는 이오노머 분포를 가지게 된다. 이러한 균일한 이오노머 분포는 산소가 촉매층에 접근하는데 장애로 발생하여 물질전달저항을 증가시킬 수 있다. 따라서 EG의 함량이 증가할수록 고전류밀도에서도 높은 전류밀도를 나타내는 것으로 추정된다.

3.3 순환전압전류법

동일한 MEA에 대해서 순환전압전류곡선(Cyclic Voltammogram, CV)을 이용하여 분석한 결과를 Fig 4에 나타내었다. 일반적으로 MEA 상에서 CV를 측정하면 수소 흡·탈착에 의한 전류밀도의 변화를 측정하여 촉매의 전기화학적 활성 면적의 계산이 가능하다. 따라서, 이를 통하여 이오노머의 흡착 여부를 어느정도 예상할 수 있다. 그러나 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 Pt 촉매에서 수소 흡·탈착이 나타내는 면적은 크게 변화하지 않았다. 이는 Pt 촉매 상에서 수소의 흡·탈착만을 관찰하는 CV 반응에서는 촉매피독에 의해서 심각한 영향을 받지 않는 것으로 추정이 가능하다.²⁶⁻²⁷⁾ 다만, 향후에 추가 실험을 통하여 수소 흡·탈착과 피독과의 상관관계에 대한 정확한 진단을 진행할 예정이다.

3.4 전기화학 임피던스 분광법

MEA에서의 성능을 종합적으로 분석하기 위해 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 사용하여 OCV 대비 40 mV, 200 mV, 400 mV, 600 mV의 과전압에서의 임피던스를 분석하여 Fig. 5에 나타내었다. T. Reshetenko 등의

연구에 의하면 저전류밀도 구간(800-900 mV vs. NHE)에서 나타나는 EIS는 고주파 영역과 중간 주파수 영역에서 2개의 반원 모양이 나타나고 이는 각각 애노드 및 캐소드에서의 전하전달저항(Charge Transfer Resistance, R_{ct})를 의미한다고 보고되었다.²⁸⁾ Fig. 5(b)는 200 mV 과전압에서 측정된 결과이며 애노드와 캐소드에서의 각각의 R_{ct} 가 가장 잘 표현되는 영역에서의 그림이다. 이때 4개의 MEA 샘플을 애노드와 캐소드로 나누어 R_{ct} 를 계산하여 비교했을 때, EG 비율이 증가할수록 캐소드의 R_{ct} 가 291, 285, 275, 220 $m\Omega \cdot cm^2$ 으로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 Tafel 성능 및 MA에서와 동일한 경향으로 EG의 함량이 증가할수록 전극층의 성능이 개선됨을 알 수 있다. 다른 과전압영역에서도 EG함량이 증가할수록 반원에 크기에 해당하는 R_{ct} 가 동일하게 감소하였고, 이는 EG의 증가에 따라서 이오노머의 흡착이 감소됨을 알 수 있다. 400 mV의 고전류밀도의 임피던스에서도 동일하였으며, EG의 함량이 증가함에 따라 촉매 피독 및 산소의 확산 저항이 감소하여 MEA의 성능이 증가하였음을 추측할 수 있다.

또한 EG 비율이 높은 MEA에서는 HFR이 개선되는 결과를 나타내었다. HFR은 MEA의 저항 중 가장 큰 부분을 차지하는 옴 저항으로 전해질막, 이오노머에서의 이온전달저항, 셀 내부에서의 저항 등의 합으로 나타난다. 본 연구에 사용된 MEA는 동일한 전해질막을 사용하였으나 캐소드 전극의 EG함량에 따라서 HFR에서 큰 변화가 관찰되었다. EG함량이 적을수록 (NMP양이 증가할수록) 높은 HFR을 나타내었으며, Fig. 2에서 보인 것처럼 전류밀도가 증가할수록 HFR이 빠른 시간에 평형값에 도달하였다. NMP가 100%인 경우에는 250 mA/cm^2 의 전류밀도에서 평형값에 도달하였고, EG가 증가할수록 더 낮은 전류밀도에서 평형값에 도달하였다.

AMFC는 캐소드에서 물 분자가 반응에 의해서 소비되고 애노드방향으로 전기삼투현상(Electro-osmotic drag)이 발생하여 작동 원리상 캐소드가 쉽게 건조해질 수 있다. 그러므로 캐소드 전극에서의 적절한 가습을 통한 물 균형 관리가 중요하다. HFR의 평형값에 도달하는 전류밀도를 고려하면, EG의 함량에 따라서 전극 내에서 물의 이동이 많은 영향을 받은 것으로 추측된다. 특히 NMP 100%를 이용하여 만든 전극은 이오노머의 분포가 매우 균일하여 전극 내의 물 이동이 매우 활발하게 발생할 가능성이 높다. 이를 통해서 전해질막 쪽으로의 전기삼투현상이 증가될 가능성이 높다. 따라서 캐소드 전극이 쉽게 건조해져 250 mA/cm^2 의 비교적 높은 전류밀도에 도달하여야 HFR값이 평형에 도달하는 결과를 보여준 것으로 보여진다.

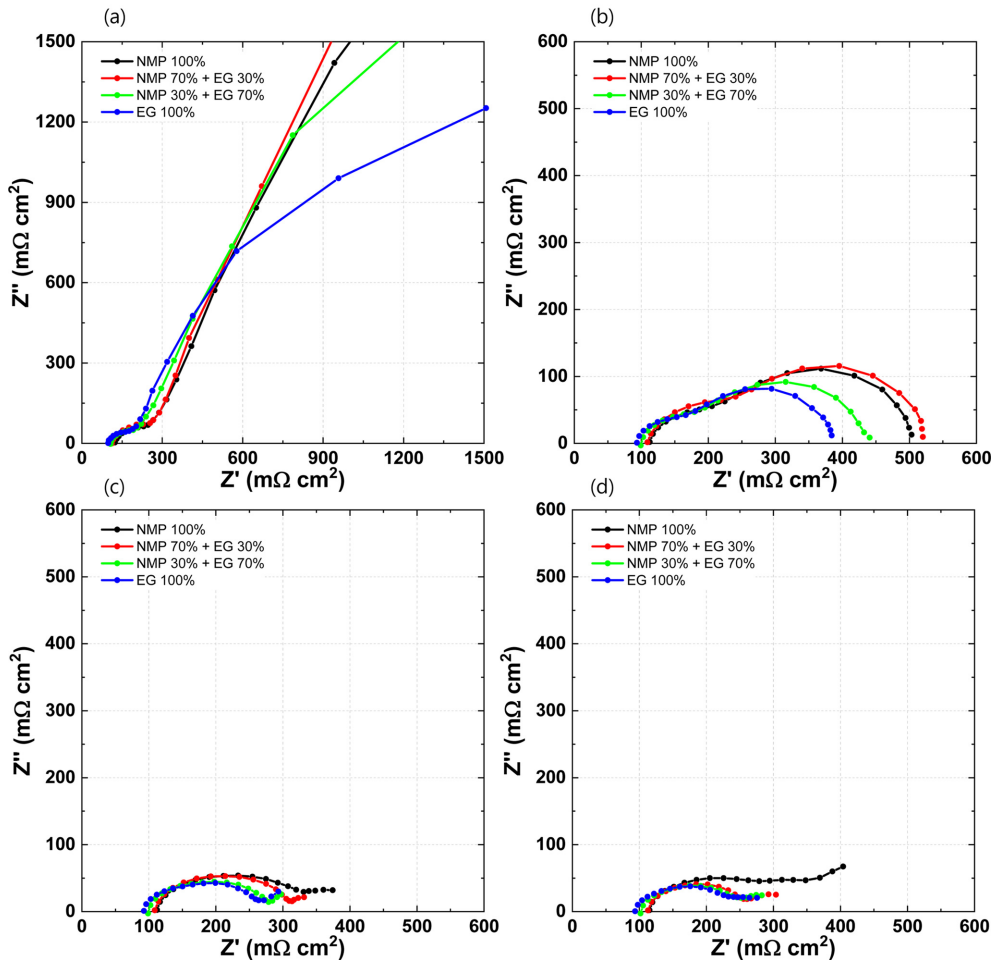


Fig. 5. Electrochemical impedance spectroscopy at (a) 40 mV overpotential (b) 200 mV overpotential (c) 400 mV overpotential (d) 600 mV overpotential.

4. 결 론

본 연구에서는 촉매 슬러리 내 고비점의 비용매를 일정 비율로 추가하여 이오노머의 응집을 유발시키고 Pt 촉매와의 흡착을 억제시키는 방법으로 캐소드 전극을 제조하였다. 그 결과 비용매의 비율이 높을수록 MEA 성능이 향상되었다. 주요 요인으로는 iR-free 전압전류곡선에서 Tafel 성능과 MA의 개선이 이루어짐과 동시에 EIS에서 측정된 캐소드의 R_{ct} 가 감소했기 때문이다. 이러한 원인을 통해서 캐소드 전극층에서 성능 개선이 이루어졌으며 그로 인해 저전류밀도 영역에서 전압 손실이 개선된 것으로 보인다. 또한 이오노머 응집으로 인하여 산소의 확산이 원활하게 유도되어 고전류밀도에서의 성능도 동시에 향상된 것으로

추측된다. 향후 비용매 추가에 따른 전극층 구조에 대한 심층적인 분석을 통해서, 보다 개선된 AMFC MEA를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구(논문)은 2021년 한국에너지기술연구원 주요 과제(C1-2489)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. Q. He, E. Cairns, Review—Recent Progress in Electrocatalysts for Oxygen Reduction Suitable for Alkaline Anion Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society* **162**, F1504-F1539

- (2015).
2. T. J. Omasta *et al.*, Importance of balancing membrane and electrode water in anion exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* **375**, 205-213 (2018).
 3. T. J. Omasta, X. Peng, C. A. Lewis, J. R. Varcoe, W. E. Mustain, Improving Performance in Alkaline Membrane Fuel Cells through Enhanced Water Management. *ECS Transactions* **75**, 949-957 (2016).
 4. T. J. Omasta *et al.*, Beyond catalysis and membranes: Visualizing and solving the challenge of electrode water accumulation and flooding in AEMFCs. *Energy and Environmental Science* **11**, 551-558 (2018).
 5. H. Yanagi, K. Fukuta, Anion Exchange Membrane and Ionomer for Alkaline Membrane Fuel Cells (AMFCs). *ECS Transactions* **16**, 257-262 (2019).
 6. Y. Zheng *et al.*, Quantifying and elucidating the effect of CO₂ on the thermodynamics, kinetics and charge transport of AEMFCs. *Energy & Environmental Science* **12**, 2806-2819 (2019).
 7. 배병찬, 김은영, 이소정, 이혜진, 알칼리연료전지용 음이온교환전해질막의 연구 동향 및 전망. *신재생에너지* **11**, 52-61 (2015).
 8. I. Matanovic *et al.*, Adsorption of Polyaromatic Backbone Impacts the Performance of Anion Exchange Membrane Fuel Cells. *Chemistry of Materials* **31**, 4195-4204 (2019).
 9. I. Matanovic, H. T. Chung, Y. S. Kim, Benzene Adsorption: A Significant Inhibitor for the Hydrogen Oxidation Reaction in Alkaline Conditions. *The Journal of Physical Chemistry Letters* **8**, 4918-4924 (2017).
 10. H. T. Chung, U. Martinez, I. Matanovic, Y. S. Kim, Cation-Hydroxide-Water Coadsorption Inhibits the Alkaline Hydrogen Oxidation Reaction. *The Journal of Physical Chemistry Letters* **7**, 4464-4469 (2016).
 11. E. S. Davydova, S. Mukerjee, F. Jaouen, D. R. Dekel, Electrocatalysts for Hydrogen Oxidation Reaction in Alkaline Electrolytes. *ACS Catalysis* **8**, 6665-6690 (2018).
 12. D. Li, H. T. Chung, S. Maurya, I. Matanovic, Y. S. Kim, Impact of ionomer adsorption on alkaline hydrogen oxidation activity and fuel cell performance. *Current Opinion in Electrochemistry* **12**, 189-195 (2018).
 13. D. Li *et al.*, Phenyl Oxidation Impacts the Durability of Alkaline Membrane Water Electrolyzer. *ACS Applied Materials & Interfaces* **11**, 9696-9701 (2019).
 14. D. Strmcnik *et al.*, The role of non-covalent interactions in electrocatalytic fuel-cell reactions on platinum. *Nature Chemistry* **1**, 466-472 (2009).
 15. W. Heiland, E. Gileadi, J. O. M. Bockris, Kinetic and Thermodynamic Aspects of the Electrosorption of Benzene on Platinum Electrodes. *The Journal of Physical Chemistry* **70**, 1207-1216 (1966).
 16. M. P. Soriaga, A. T. Hubbard, Determination of the orientation of adsorbed molecules at solid-liquid interfaces by thin-layer electrochemistry: aromatic compounds at platinum electrodes. *Journal of the American Chemical Society* **104**, 2735-2742 (1982).
 17. T. Reshetenko, J. St-Pierre, Study of the aromatic hydrocarbons poisoning of platinum cathodes on proton exchange membrane fuel cell spatial performance using a segmented cell system. *Journal of Power Sources* **333**, (2016).
 18. Z. Xie *et al.*, Nafion Ionomer Aggregation and its Influence on Proton Conduction and Mass Transport in Fuel Cell Catalyst Layers. *ECS Transactions* **16**, 1811-1816 (2008).
 19. J. H. Lee *et al.*, Dispersion-Solvent Control of Ionomer Aggregation in a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *Scientific Reports* **8**, 10739 (2018).
 20. B. Britton, S. Holdcroft, The Control and Effect of Pore Size Distribution in AEMFC Catalyst Layers. *Journal of The Electrochemical Society* **163**, F353-F358 (2016).
 21. X. Shi *et al.*, Maximization of quadruple phase boundary for alkaline membrane fuel cell using non-stoichiometric α -MnO₂ as cathode catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy* **44**, 1166-1173 (2019).
 22. D. Sebastián *et al.*, Optimization of the Catalytic Layer for Alkaline Fuel Cells Based on Fumatech Membranes and Ionomer. *Catalysts* **10**, 1353 (2020).
 23. H. J. Park *et al.*, Effect of N-cyclic cationic groups in poly(phenylene oxide)-based catalyst ionomer membranes for anion exchange membrane fuel cells. *Journal of Membrane Science* **608**, 118183 (2020).
 24. M. S. Cha *et al.*, Poly(carbazole)-based anion-conducting materials with high performance and durability for energy conversion devices. *Energy & Environmental Science* **13**, 3633-3645 (2020).
 25. J. Zhang *et al.*, Self-adjusting anode catalyst layer for smart water management in anion exchange membrane fuel cells. *Cell Reports Physical Science* **2**, 100377 (2021).
 26. T. Yoda *et al.*, Gas diffusion electrodes containing sulfonated poly (arylene ether) ionomer for PEFCs. *Electrochimica Acta* **54**, 4328-4333 (2009).
 27. B. Bae, K. Miyatake, M. Watanabe, Sulfonated Poly (arylene ether sulfone ketone) Multiblock Copolymers with Highly Sulfonated Block. Synthesis and Properties. *Macromolecules* **43**, 2684-2691 (2010).
 28. T. Reshetenko, M. Odgaard, D. Schlueter, A. Serov, Analysis of alkaline exchange membrane fuel cells performance at different operating conditions using DC and AC methods. *Journal of Power Sources* **375**, 185-190 (2018).