

산화전극 결합제로서 나피온용액에 혼합된 에폭시가 미생물연료전지의 성능에 미치는 영향

Effect of Epoxy Mixed with Nafion Solution as an Anode Binder on the Performance of Microbial Fuel Cell

송영채[†] · 김대섭* · 우정희

Young-Chae Song[†] · Dae-Seop Kim* · Jung-Hui Woo

한국해양대학교 환경공학과 · *코비

Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University · *KORBI, Co. Ltd.

(2013년 11월 4일 접수, 2013년 12월 9일 채택)

Abstract : The composite anodes of exfoliated graphite (EG) and multiwall carbon nanotube (MWCNT) were fabricated by using the binders with different content of epoxy in Nafion solution. The influence of the epoxy content in the anode binder on the performance of microbial fuel cell (MFC) was examined in a batch reactor. With the increase in the epoxy content in the anode binder, increase in physical binding force was observed, but at the same time an increase in the internal resistance of MFC was also observed. This was due to the increase in activation and ohmic resistance. For the anode binder without epoxy, the maximum power density was 1,892 mW/m², but a decrease in maximum power density was observed with the increase in the epoxy content in the anode binder. With the epoxy content of 50% in the anode binder, a decrease in the maximum power density to 1,425 mW/m² was observed, which about 75.3% of the anode binder without epoxy is. However, the material consisting of the same amount of epoxy and Nafion solution is a good alternative for anode binder in terms of durability and economics of MFC.

Key Words : Microbial Fuel Cell (MFC), Anode, Binder, Epoxy, Nafion Solution

요약 : 팽창흑연과 탄소나노튜브를 이용한 복합 산화전극을 나피온용액에 다양한 비율로 에폭시를 혼합한 결합제를 이용하여 제작하였으며, 산화전극 결합제에 함유된 에폭시량이 미생물연료전지의 성능에 미치는 영향을 회분식 실험을 통하여 조사하였다. 산화전극 결합제에 에폭시의 함량이 증가함에 따라 산화전극 구성 물질들의 물리적 부착력은 점차 증가하였으나, 활성화저항과 오음저항의 증가로 인한 내부저항이 증가하였다. 산화전극 결합제로 에폭시를 혼합하지 않고 나피온용액 만을 사용한 대조구의 경우 1,892 mW/m²에 달하였으나 산화전극 결합제에 에폭시 함량이 증가함에 따라 미생물연료전지의 최대전력밀도는 점차 감소하였다. 산화전극 결합제에 에폭시함량이 50%일 때 최대전력밀도는 1,425 mW/m²로서 대조구의 75.3%까지 감소하였으나, 고가의 나피온용액 사용량을 감소시키고 산화전극 결합제의 물리적 부착력을 높일 수 있다는 측면에서 고려할 때 나피온용액과 에폭시를 같은 비율로 혼합한 물질은 산화전극결합제로서의 좋은 대안이 될 수 있는 것으로 판단된다.

주제어 : 미생물연료전지, 산화전극, 결합제, 에폭시, 나피온용액

1. 서론

미생물연료전지는 유기물에 함유된 화학에너지를 전기적으로 활성을 가진 미생물의 촉매작용을 이용하여 전기에너지로 전환시키는 장치로서 하폐수를 처리함과 동시에 전기 에너지를 회수할 수 있는 그린기술이다.¹⁻³⁾ 미생물연료전지에 대한 연구는 지난 10여 년간 과학자들에 의하여 수행되어 왔으나 여전히 고가의 시설 및 재료비와 낮은 전력수율로 인하여 폐수처리 현장에서 사용하지 못하고 있다.^{2,4)} 미생물연료전지는 전기적으로 활성을 가진 미생물이 부착성장하는 산화전극과 전자와 양성자가 산소와 결합하는 산소 환원반응이 일어나는 환원전극 그리고 산화전극과 환원전극을 연결하는 전기회로로 구성된다. 따라서, 산화전극의 표면에서 유기물의 분해를 통한 전자의 생산속도와 생산된 전자를 산화전극으로 전달하는 효율을 높이는 것은 미생물연료전지의 성능을 향상시킬 수 있는 방법 중의 한가지이

다. 산화전극 재료의 높은 생물친화도, 넓은 표면적과 공극, 전기전도성, 내구성, 재료비용 등은 산화전극 반응의 효율에 큰 영향을 미치는 인자들이다.⁵⁻⁷⁾ 그 동안 탄소전, 흑연입자, 흑연섬유, 흑연펠트, 다공성유리탄소, 탄소섬유 브로쉬 등과 같은 다양한 탄소재질의 전도성물질들이 산화전극 재료로 사용되어 왔다.^{5,6,8)} 특히, 이러한 탄소기반의 물질들 중에서 팽창흑연은 가격이 저렴하고 미생물이 이용 가능한 비표면적이 넓고, 생물친화도가 높으며, 탄소나노튜브는 비표면적이 넓으며, 전도성이 우수한 전극재료로 알려지고 있다.^{5,9,10)} 그러나, 이러한 탄소기반의 재료들을 이용하여 산화전극을 제작하기 위해서는 이러한 재료들을 물리적으로 결합시키고 이를 집전체에 고정하기 위한 결합제가 필수적으로 필요하다. 지금까지 미생물연료전지에서 산화전극의 제조에 널리 사용하여 온 결합제로는 나피온용액과 PTFE 이었다.^{7,11)} 결합제로서 전도성고분자 물질인 나피온 용액은 높은 산화전극의 효율을 보였으나 대단히 고가의 물질이며,

[†] Corresponding author E-mail: soyoc@kmou.ac.kr Tel: 051-410-4417 Fax: 051-410-4415

부착강도가 약하여 제작된 산화전극의 내구성에 문제가 있었다. PTFE는 가격이 저렴한 반면 소수성물질이기 때문에 PTFE를 결합제로 사용하여 제작된 산화전극의 효율이 상대적으로 낮았다. 따라서, 제작된 산화전극의 효율이 우수하고 내구성이 있으며, 가격이 저렴한 결합제의 개발이 미생물연료전지를 실용화를 하기 위해서 필요하다.

본 연구에서는 가격이 상대적으로 저렴하고 접착력이 우수한 에폭시를 나피온용액과 혼합하여 제조한 복합결합제를 사용하여 EG와 CNT 혼합물 산화전극들을 제조하였으며, 회분식 MFC를 이용하여 산화전극 결합제로 사용된 나피온용액에 에폭시의 혼합비가 미생물연료전지의 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 에폭시혼합 결합제 및 전극제조

전극의 제조에 사용된 MWCNT (Carbon Nano-material Technology Co., Ltd., Pohang, Korea), 산처리 된 분말흑연 (Hyundai Coma Industry, Inc., Seoul, Korea), 하이드라진 (80%, Chameleon Analytical Reagent, Japan), 에폭시(Axia EP-30G, Alteco Koera Inc), PTFE (Polytetrafluoroethylene 60% dry wt. PTFE dispersed in water, Sigma-Aldrich Co., St. Louise, USA) 및 Nafion solution (30 %wt., Sigma-Aldrich Co., St. Louis, USA)을 각각 화학약품상에서 구입하였다. MWCNT는 표면에 존재하는 불순물을 제거하고, 친수성으로 변환시키기 위하여 진한질산용액에 6시간 동안 침지시킨 뒤 흐르는 수돗물로 pH 7이 될 때까지 세척한 뒤 건조하여 사용하였다. 팽창흑연은 산 처리 된 흑연 분말을 극초단파로 10초간 처리하여 산화팽창흑연(Exfoliated Graphite Oxidation)을 준비하였다. 산화팽창흑연은 pH 7이 될 때까지 증류수로 세척하여 건조시켰으며, 증류수와 하이드라진을 1,000 : 1의 비율로 혼합한 용액에 침지시킨 뒤 극초단파로 20분간 처리하여 환원시켜 건조하였다. 산화전극 결합제로서 나피온용액에 에폭시를 혼합하여 결합제에 에폭시의 함량이 중량비로 50, 75, 100%가 되도록 준비하였으며,

에폭시를 혼합하지 않고 나피온용액 만을 100% 사용한 것을 대조구 결합제로 사용하였다. EG와 CNT를 1대 2로 혼합한 뒤 준비한 결합제와 ethyl alcohol 100 mL를 혼합한 뒤 16 cm² (4 cm × 4 cm)의 스텐망(30 mesh) 집전체에 스크린 프린팅법으로 부착시켜 산화전극을 제작하였다. 제작된 산화전극은 테이블에 가볍게 타격하는 방법으로 팽창흑연과 탄소나노튜브 혼합물의 물리적 결합정도를 확인하였다.

공기 환원전극(Air Cathode)은 Song¹²⁾에 따라 면적이 16 cm² (4 cm × 4 cm)인 기본전극을 준비하였으며, 결합제로 사용된 Nafion 용액과 산소환원촉매를 혼합하여 반죽을 만든 뒤 기본전극의 한쪽 표면에 산소환원촉매를 스크린 프린팅하여 제작하였다.¹²⁾ 기본전극은 PTFE와 다중벽탄소나노튜브를 중량기준 3대 7로 혼합하여 스텐망에 스크린프린팅하고 한 면에 PTFE 용액을 3번 칠한 뒤 370°C에서 20분간 열압착하여 제작하였다. 산소환원반응 촉매는 질산처리 된 다중벽탄소나노튜브 1.875 g, MnSO₄·H₂O 30.125 g, KMnO₄ 19.75 g, FePc 0.5684 g, CuPc 0.5761 g을 증류수 1 L에 녹이고 2시간 동안 교반하여 복합금속 촉매 용액을 준비하였다. 준비된 용액을 1분 30초간 극초단파처리하고 60초 냉각하는 과정을 5회 반복하여 산소환원반응 촉매를 다중벽탄소나노튜브 표면에 고정하여 준비하였다.

2.2. MFC 장치 및 운전

에폭시가 함유된 결합제를 사용한 산화전극들의 성능을 평가하기 위하여 아크릴수지로 제작된 큐브형 단일반응조 미생물연료전지(유효부피 972 mL; 9 cm × 9 cm × 12 cm)를 사용하였다(Fig. 1(a)). 전지의 4 수직면에는 정사각형의 창(4 cm × 4 cm)을 설치하였으며, 각각의 창에서 공기와 접한 바깥쪽에는 환원전극을 설치하였다. 각 창에서 용액과 접한 내면에는 팽창흑연과 탄소나노튜브 혼합물로 제작한 산화전극과 대조구를 각각 설치하였다. 산화전극과 환원전극의 사이에는 면적이 16 cm² (4 cm × 4 cm)인 폴리프로필렌 부직포를 분리막으로 설치하였다(Fig. 1(b)). 산화전극과 환원전극을 도선으로 연결하여 외부회로를 구성하였으며, 회로에는 200 Ω의 외부저항을 설치하였다. 준비된 미생물연료전지는 30°C가 유지되도록 조절되는 항온조에 설치하였

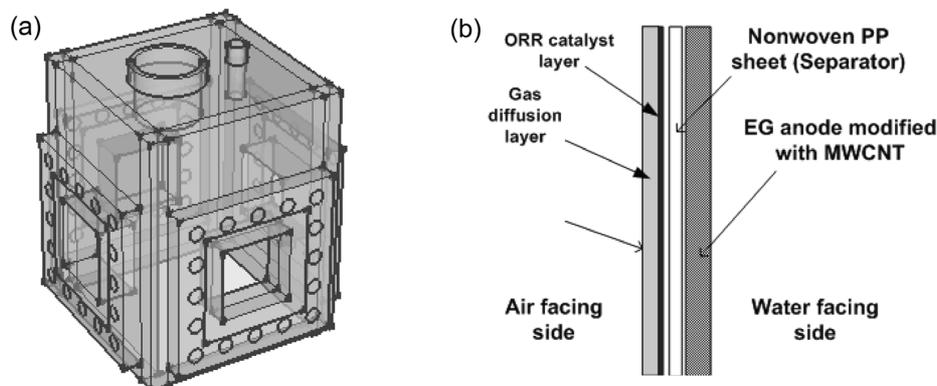


Fig. 1. Schematic diagram of cube type microbial fuel cell: Batch microbial fuel cell (a) and placement of electrodes in each window (b).

으며, 운전하는 동안 마그네틱 바를 사용하여 산화전극 내용물을 200 rpm으로 연속교반 하였다. 시험에 사용한 폐수는 Song¹²⁾의 방법에 따라 초산(1,000 mg/L), 인산염완충용액(50 mM), 미네랄(12.5 mL/L), 비타민(12.5 mL/L)으로 합성하여 제조하였다.¹²⁾ 초기운전을 위하여 산화전극부 유효부피의 70%를 합성폐수로 채웠으며, 나머지 30%는 식중슬러지를 주입하였다. 식중슬러지는 S 하수종말처리장의 혐기성소화슬러지를 채취한 것으로 체거름한 후 사용하였으며, 식중 전에 별도의 농화배양은 하지 않았다. 미생물연료전지를 운전하는 동안 컴퓨터에 연결된 디지털멀티미터(Model 2700, Keithley Instruments Inc., Ohio, USA)를 이용하여 미생물연료전지에서 발생하는 전압을 모니터링 하였으며, 관측한 전압이 30 mV 이하로 감소하였을 때 기질이 고갈된 것으로 판단하고 산화전극부의 합성폐수를 교환하였다.

2.3. 분석 및 계산

미생물연료전지를 운전하는 동안 관측한 전압이 일정하였을 때 외부회로를 개방하여 개회로전압(open circuit voltage, OCV)을 측정하였으며, 외부저항을 1,000 Ω에서 1 Ω까지 수작업으로 변화시키면서 안정화된 전압을 측정하는 방법으로 분극실험을 실시하였다. 이때 전류(I)는 측정된 전압(V)을 외부저항으로 나누어 계산하였다. 전력밀도(mW/m^2)는 전류(I)와 전압(V)을 곱한 값을 전극면적으로 나누어 계산하였다. 미생물연료전지에서 산화전극에 사용된 에폭시의 함량에 따른 내부저항 구성성분들의 변화특성을 살펴보기 위하여 Song¹²⁾의 방법에 따라 분극곡선에서 보여주는 I-V 데이터를 식 (1)에 비선형회귀분석법으로 곡선접합하였다. 비선형회귀분석은 Matlab (R2010, The mathworks, Inc., MA, USA)의 curve fitting tool box 3.0을 사용하였다.

$$V = V_{oc} - (a + b \times \ln I) - I \times R_{ohm} - c \times \ln \frac{I_L}{I_L - I} \quad (1)$$

여기서, V는 전압이며, V_{oc} 는 개회로전압이다. a와 b는 활성화손실상수들이며, R_{ohm} 은 오음저항이다. c는 분극손실상수이며, I_L 은 한계전류이다. 활성화저항(R_{act}) 및 분극저항(R_{conc})은 다음 식 (2) 및 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$R_{act} = (a + b \times \ln I) / I \quad (2)$$

$$R_{conc} = [c \times \ln [I_L / (I_L - I)]] / I \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 전압과 전력밀도

산화전극의 제조에 사용된 결합제에 함유된 에폭시의 량에 따른 회분식 미생물연료전지의 관측 전압들은 Fig. 2와

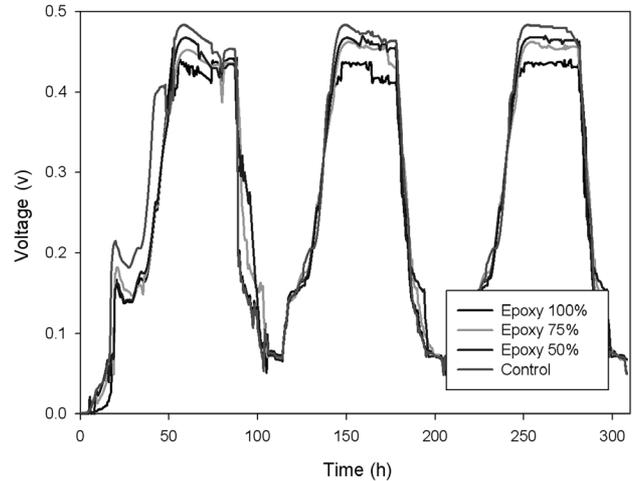


Fig. 2. Voltage changes for the MFCs with anodes containing different epoxy contents in the binder.

같다. 초기운전 이후 관측 전압은 운전 2일째부터 모든 산화전극에서 가파르게 증가하였다. Nafion 용액 100%를 산화전극 결합제로 사용한 대조구의 경우 초기운전시의 급격한 전압상승이 에폭시를 혼합한 경우에 비하여 약간 빨랐다. 초기 전압의 상승은 전기적으로 활성을 가진 미생물이 산화전극표면에 부착하고 전자를 전달하기 시작하는 초기순응시간과 관련이 있다. Nafion 용액 100%를 산화전극 결합제로 사용한 대조구 산화전극표면의 경우 생물친화도가 에폭시를 혼합한 결합제를 사용한 산화전극에 비하여 다소 우수함을 나타낸다. 그러나, 산화전극 결합제에 함유된 에폭시의 함량에 의해서 시간에 따른 전압의 상승 패턴의 뚜렷한 차이는 없었다. 이것은 에폭시가 전기적으로 활성을 가진 미생물에 미치는 직접적인 독성이 거의 없기 때문이다.

1주기 회분식 실험동안 대조구의 최대 전압은 약 0.48 V 정도로서 가장 높았다. 결합제에 함량이 75% 및 50%인 산화전극을 설치한 미생물연료전지의 최대 전압은 0.47 V와 0.45 V로 큰 차이가 없었으나, 에폭시 100%를 결합제로 사용하여 제작한 산화전극을 설치한 미생물연료전지의 경우 최대전압은 약 0.44 V로 4개의 산화전극중 가장 낮았다. 그러나, 1주기 회분식 실험에서 최대 전압은 다소 불안정하였다. 이것은 산화전극의 표면에서 부착 성장하는 전기적으로 활성을 가진 미생물막이 완전히 성숙하지 못하였기 때문이다. 전압이 감소하여 기질이 고갈되었다고 판단되면 새로운 기질로 교체하는 방법으로 2주기 및 3주기 회분식 실험을 수행한 결과 3주기에서 모든 전지에서 최대전압은 일정 시간 동안 안정적으로 유지되었다.

따라서, 시험한 산화전극들을 설치한 미생물연료전지의 최대전력밀도를 평가하여 결합제에 혼합한 에폭시의 함량이 성능에 미치는 정도를 조사하기 위하여 회로를 개방하고 산화전극과 환원전극 각각의 OCV를 측정하였다(Table 1). 3주기의 회분식 실험에서 환원전극의 OCV 값은 0.109~0.117 V로서 큰 차이가 없었으나 산화전극의 OCV 값은 -0.518~-0.447 V로서 에폭시 함량의 증가함에 따라 양의 값

Table 1. Open circuit voltages and Power density for the MFC with anodes containing different epoxy content in the binder

Anode	OCV _{anode} (V)	OCV _{cathode} (V)	OCV _{cell} (V)	Max power density (mW/m ²)
Epoxy 100%	-0.447	0.115	0.562	676
Epoxy75%	-0.475	0.109	0.584	756
Epoxy50%	-0.514	0.110	0.604	1,425
Control	-0.518	0.117	0.635	1,892

쪽으로 증가하였다. 또한, 전체 전지의 OCV는 0.562~0.635 V로 에폭시의 함량에 따라 감소하였으며, 이 값은 산화전극의 OCV에 의해서 결정되었다. 산화전극의 열역학적인 전위는 기질의 종류, pH, 온도 등과 같은 인자들에 의해서 영향을 받는다.^{1,13)} 최대전력밀도로 나타나는 MFC의 성능은 전지의 개회로전압과 내부저항으로 평가할 수 있다.¹⁾

열역학적인 전위와 개회로상태에서의 산화전극 OCV의 차이는 미생물이 산화전극으로 전자를 전달하는 반응의 활성화에너지와 관련이 있다고 볼 수 있다. 결합제로 사용된 에폭시가 혼합된 나피온 용액이 산화전극의 표면에 부착됨으로써 인하여 전자전달 반응의 활성화 에너지가 증가한 것으로 보인다.

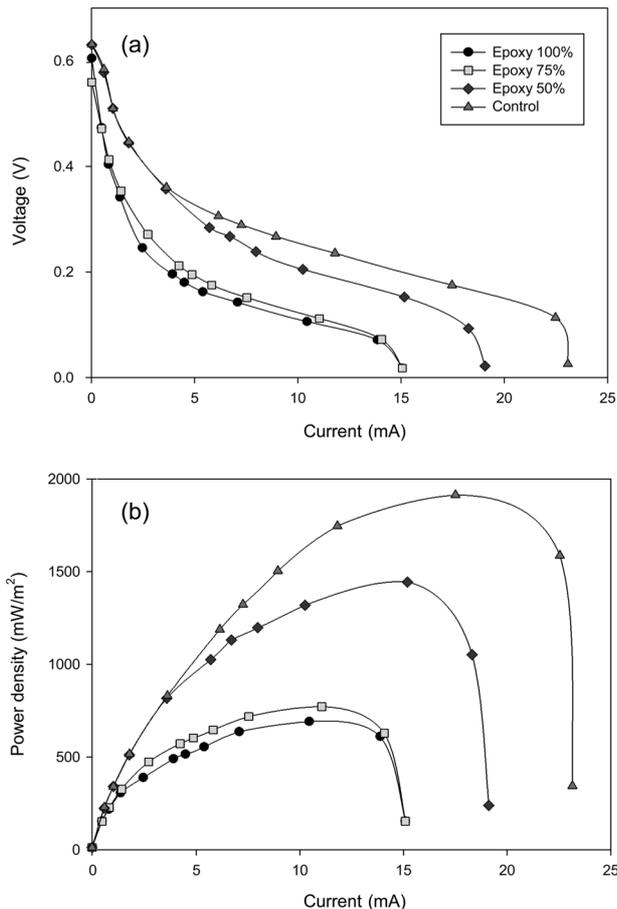


Fig. 3. Polarization curves for the MFC with anodes containing different epoxy contents in the binder.

분극곡선으로부터 구한 최대전력밀도는 Epoxy 100% 산화전극의 경우 676 mW/m²로서 Nafion 100%를 산화전극 결합제로 사용한 대조구의 1,892 mW/m²의 35.7%에 불과하였다(Fig. 3). 그러나, 산화전극 결합제에 Epoxy 함량이 50%인 경우 최대전력밀도는 각각 1,425 mW/m²로서 Nafion 용액 100%를 사용한 대조구의 75.3%에 달하였다. 결합제에 에폭시 함량이 증가함에 따라 전력밀도가 감소한 것은 OCV의 감소와 더불어 활성화손실 및 분극과전위, 그리고 오음저항으로 구성된 내부저항의 증가 때문으로 여겨진다.

3.2. 산화전극 결합제의 에폭시 함량에 따른 내부저항 비교

산화전극 결합제에 사용된 에폭시 함량이 미생물연료전지의 내부저항 구성성분들에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전류-전압곡선을 해석하였다. 전류의 흐름이 없는 개회로상태의 활성화저항은 대조구의 경우 151.9 ohm이었다. 그러나, 에폭시 함량이 50%인 경우 활성화저항은 179.0 ohm으로 증가하였으며, 에폭시 100%의 경우 활성화저항은 311.4 ohm로서 대조구에 비해 2배 이상 높은 값을 보였다. 또한, 시험된 미생물연료전지에서 활성화저항은 전류가 증가함에 따라 지속적으로 감소하였으나, 최대전력밀도에서 산화전극 결합제에 사용된 에폭시 함량에 따른 활성화저항은 Epoxy 100% (32.71 Ω) > Epoxy 75% (29.48 Ω) > Epoxy 50% (18.29 Ω) > Nafion 100% (14.68 Ω) 순으로서 결합제에 에폭시 함량증가에 따라 증가하였다(Fig. 4).

오음저항은 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 전류에 따른 변화 없이 일정한 값을 보였으나 전도성 고분자인 Nafion 용액 100%를 산화전극 결합제로 사용한 경우 1.23 Ω로서 가장 낮았다. 그러나, Epoxy 50% 경우 2.55 Ω 그리고 Epoxy 100%의 경우는 6.93 Ω까지 증가하였다. 결합제는 EG/CNT 산화전극에서 MWCNT로 덮힌 EG 면들을 연결하는 역할을 한다. 결합제에서 에폭시 함량의 증가는 결합제의 오음저항 증가를 의미하기 때문에 결국 산화전극의 오음저항 증가로 이어진 것이다.

최대전력밀도에서 산화전극의 종류에 따른 분극저항의 크기는 거의 차이가 없었으며, 활성화저항과 오음저항에 비하여 분극저항의 크기가 상대적으로 작아 전체 내부저항에 미치는 분극저항에 미치는 영향은 작았다. 그러나, 한계전류 부근의 전류에서 분극저항은 급격히 증가하였다. 한계전류는 분극곡선에서 저항이 급격히 증가하여 전압이 감소함에 따라 전류가 더 이상 증가하지 않는 최대전류를 의미한다. 고체산화물연료전지에서는 종종 한계전류를 전극의 반응속도에 비하여 반응물 또는 생성물의 물질전달속도가 충분하지 못하여 발생하는 높은 분극과전위를 사용하여 설명하기도 한다.^{14,15)} 미생물연료전지의 경우 한계전류는 총 내부저항을 나타내는 분극곡선의 기울기에 의해서 영향을 받지만 분극저항에 의해서 가장 크게 영향을 받으며, 분극저항은 산화전극 표면의 미생물에 공급되는 기질의 전달에 의해서 결정된다. 본 연구에서 Nafion 100%를 결합제로 사용한 대

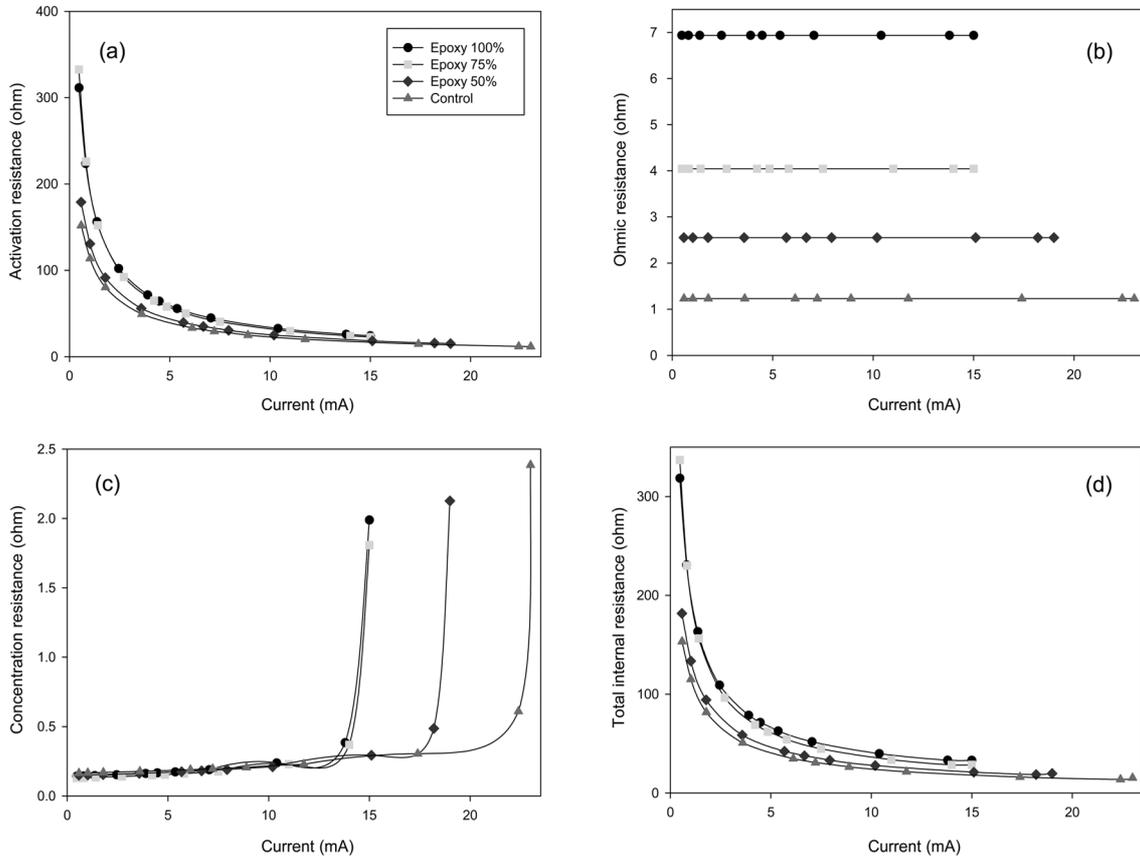


Fig. 4. Polarization test and internal resistance curves for the MFCs with anodes containing different epoxy contents in the anode binder (Activation resistance (a), Ohmic resistance (b), Concentration resistance (c), total internal resistance (d).

조구의 경우 한계전류는 약 23 mA이었으나, 에폭시함량이 50%인 경우 약 19 mA로 감소하였다. 그러나, 결합제에 혼합된 에폭시 함량이 75% 및 100% 인 경우 약 15 mA로서 큰 차이가 없었다. 따라서, 결합제에 혼합된 에폭시 함량의 증가는 산화전극에서 전기적으로 활성을 가진 미생물이 부착 성장하는 유효표면적을 감소시켰을 것으로 여겨지며, 유효 표면적의 감소는 산화전극 표면의 미생물에 공급되는 기질의 양을 제한하기 때문에 유효표면적의 감소가 한계전류의 감소에 가장 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

본 연구에서 간이 타격실험으로 산화전극의 견고성을 확인한 결과 나피온용액 100%를 결합제로 이용하여 제작한 대조구 산화전극은 작은 물리적 타격에서도 전극의 구성물질인 팽창흑연과 탄소나노튜브가 쉽게 떨어지는 현상을 보였다. 그러나, 산화전극 구성물질의 물리적 결합력은 결합제에 에폭시함량에 따라 증차 증가하였다. 이것은 결합제로 사용된 나피온용액에 혼합된 에폭시함량이 증가함에 따라 산화전극의 내구성이 증가함을 의미한다. 또한, 에폭시는 나피온용액에 비하여 약 26.7배 저렴한 물질로 알려지고 있다. 따라서, 나피온용액과 에폭시를 같은 비율로 혼합하여 산화전극 결합제로 사용하는 경우 경제성 및 내구성 측면에서 유리할 것이라는 것을 의미한다. 상기한 연구결과로부터 본 연구에서 직접 시험하지는 않았으나 나피온용액 75% 및 에폭시 25% 혼합하여 산화전극 결합제로 사용하면 나피

Table 2. Internal resistance distribution at maximum power densities for the MFC with anodes containing different epoxy contents in the binder (unit : Ω)

Anode	R_{act}	R_{ohm}	R_{conc}	Total
Epoxy 100%	32.71	6.93	0.23	39.87,0
Epoxy 75% Nafion 25%	29.48	4.04	0.23	33.75
Epoxy 50% Nafion 50%	18.29	2.55	0.29	21.13
Nafion 100%	14.68	1.23	0.3	16.21

온용액과 에폭시를 같은 비율로 혼합하여 산화전극 결합제로 사용한 경우에 비하여 최대전력밀도는 증가할 것으로 예측되지만 제작된 전극의 물리적인 안정성은 다소 감소할 것으로 예측할 수 있다.

4. 결론

팽창흑연과 다중벽탄소나노튜브로 구성된 산화전극 제조에 사용된 나피온 용액 결합제에 혼합된 에폭시의 함량이 미생물연료전지의 성능에 미치는 영향을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다. 나피온용액을 산화전극 결합제로 사용한 미생물연료전지의 최대전력밀도는 1,892 mW/m^2 에 달하였다. 산화전극 결합제에 나피온용액에 에폭시의 함량이

50, 75 및 100%로 증가함에 따라 미생물연료전지의 최대 전력밀도는 각각 1,425, 756 및 676 mW/m²로 감소하였으나, 팽창흡연과 다중벽탄소나노튜브의 물리적 결합강도는 점차 증가하였다. 산화전극 결합체의 에폭시함량 증가에 따른 미생물연료전지의 최대전력밀도 감소는 내부저항의 증가에 기인하였으며, 내부저항은 활성화저항의 증가에 가장 크게 영향을 받았다. 나피온용액에 에폭시를 같은 비율로 혼합한 물질은 경제성과 내구성 측면에서 좋은 산화전극 결합체 대안물질이다.

KSEE

Reference

- Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. and Rabaey, K., "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), 5181~5192(2006).
- Kim, B. H., Chang, I. S. and Gadd, G. M., "Challenges in microbial fuel cell development and operation," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **76**(3), 485~494(2007).
- Song, Y. C., Yoo, K. S. and Lee, S. K., "Surface floating air cathode microbial fuel cell with horizontal flow for continuous power production from wastewater," *J. Power Sources*, **195**(19), 6478~6482(2010).
- Hamelers, H. V. M., Heijne, A. T., Sleutels, T. H. J. A., Jermiasse, A. W., Strik, D. P. B. T. B., Buisman, C. J. N., "New applications and performance of bioelectrochemical systems," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **85**(6), 1673~1685(2010).
- Song, Y. C., Woo, J. H. and Yoo, K. S., "Materials for microbial fuel cell : electrodes, separator and current collector," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **31**(9), 579~586(2009).
- Wei, J., Liang, P. and Huang, X., "Recent progress in electrodes for microbial fuel cells," *Bioresour. Technol.*, **102**(20), 9335~9344(2009).
- Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H. and Jin, T., "An overview of electrode materials in microbial fuel cells," *J. Power Sources*, **196**(10), 4427~4435(2011).
- Kumar, G. G., Sarathi, V. G. S. and Nahm, K. S., "Recent advances and challenges in the anode architecture and their modifications for the applications of microbial fuel cells," *Biosens. Bioelectron.*, **43**(15), 461~475(2013).
- Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E., Bacsa, R. R. and Roussel, A., "Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes," *Carbon*, **39**(4), 507~514(2001).
- Miao, M., "Electrical conductivity of pure carbon nanotube yarns," *Carbon*, **49**(12), 3755~3761(2011).
- Zhang, Y., Mo, G., Li, X., Zhang, W., Zhang, J., Ye, J., Huang, X. and Yu, C., "A graphene modified anode to improve the performance of microbial fuel cells," *J. Power Sources*, **196**(13), 5402~5407(2011).
- Song, Y. C., Choi, T. S., Woo, J. H., Yoo, K. S., Chung, J. W., Lee, C. Y. and Kim, B. G., "Effect of the oxygen reduction catalyst loading method on the performance of air breathable cathodes for microbial fuel cells," *J. Appl. Electrochem.*, **42**(6), 391~398(2012).
- Rabaey, K. and Verstraete, W., "Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation," *Trends Biotechnol.*, **23**(6), 291~298(2005).
- Lee, W. Y., Wee, D. and Ghoniem, A. F., "An improved one-dimensional membrane-electrode assembly model to predict the performance of solid oxide fuel cell including the limiting current density," *J. Power Sources*, **186**(2), 417~427(2009).
- Xuan, J., Leung, D. Y. C., Leung, M. K. H., Wang, H. and Ni, M., "Chaotic flow-based fuel cell built on counter-flow microfluidic network: Predicting the over-limiting current behavior," *J. Power Sources*, **196**(22), 9391~9397(2011).