

미생물 연료 전지의 반응조 형상에 따른 전기 생산효율 비교

이윤희 · 어성욱[†]

우송대학교 철도건설환경공학과

Comparison of Electricity Generation Efficiencies depending on the Reactor Configurations in Microbial Fuel Cells

Yunhee Lee · Seong-Wook Oa[†]

Department of Railroad, Civil & Environmental Engineering, Woosong University

(Received 21 April 2010, Revised 11 May 2010, Accepted 12 May 2010)

Abstract

Two different MFC designs were evaluated in batch mode: single compartment combined membrane-electrodes (SCME) design and twin-compartment brush-type anode electrodes (TBE) design (single chamber with two air cathodes and brush anodes at each side of the reactor). In SCME MFC, carbon anode and cathode electrodes were assembled with a proton exchange membrane (PEM). TBE MFC was consisted of brush-type anode and carbon cloth cathode electrodes without the PEM. A brush-type anode was fabricated with carbon fibers and was placed close to the cathode electrode to reduce the internal resistance. Substrates used in this study were glucose, leachate from cattle manure, or sucrose at different concentrations with phosphate buffer solution (PBS) of 200 mM to increase the conductivity thereby reduce the internal resistance. Hydrogen generating bacteria (HGB) were only inoculated in TBE MFC. The peak power densities (P_{peak}) produced from the SCME systems fed with glucose and leachate were 18.8 and 28.7 mW/m^2 at external loads of 1000 ohms, respectively. And the P_{peak} produced from TBE MFC were 40.1 and 18.3 mW/m^2 at sucrose concentration of 5 g/L and external loads of 470 ohms, with a mediator (2-hydroxy-1, 4-naphthoquinone) and without the mediator, respectively. The maximum power density (P_{max}) produced from mediator present TBE MFC was 115.3 mW/m^2 at 47 ohms of an external resistor.

keywords : Bioelectricity, Hydrogen generating bacteria, Mediator, Microbial fuel cells (MFCs), Proton exchange membrane

1. 서론

미생물 연료 전지(Microbial Fuel Cell, MFC)는 유기물질로부터의 에너지를 미생물학적 반응을 통하여 직접적으로 전기로 변환시키는 공정이다. 기본적인 MFC의 구조는 음극 반응조와 양극 반응조가 양이온 교환막(Proton Exchange Membrane, PEM)으로 분리되어있다. 양극 반응조(anodic compartment)에서 기질은 혐기성 상태에서 산화되어 전자와 양이온을 방출시킨다. 이때 발생된 수소이온은 PEM을 통하여 음극 반응조(cathodic compartment)로 이동되고, 음전극으로 전달된 전자는 외부 저항 회로를 통하여 양전극으로 이동된다. 음극 반응조는 호기성 상태로 유지되며, 용존산소가 수소이온과 결합하여 물로 환원된다. 최근, 이러한 기본적인 디자인의 MFC와 다른 다양한 형태의 MFC 시스템이 연구 보고되고 있다(Cheng et al., 2006; Heilmann and Logan, 2006; Liu and Logan, 2004; Liu et al., 2004). 이들은 단일 반응조, PEM의 부재(membrane-less), 공기 중에 노출된 형태의 양극 시스템(open air cathode),

그리고 매개체가 없는(mediator-less) MFC 등이었다.

MFC에서의 전자 수송 메커니즘에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 두 가지의 전자 수송을 위한 가능성 있는 메커니즘이 제시되고 있다. 첫째는, 전자들은 매개체(mediator)에 의해서 전극으로 수송된다는 것인데(Rabaey et al., 2005a), 매개체를 위한 몇몇의 화학 물질들: ferric iron (Heijne et al., 2006), thionine(Picoreanu et al., 2007), 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone(Zhang and Halme, 1995), 그리고 neutral red(Davila et al., 2008) 등이 사용되고 있다. 두 번째 이론은, 음전극에 부착된 미생물막(biofilm)의 부분인 "nanowires"에 의해 전자가 전달된다는 것인데, nanowires는 미생물막 내부의 박테리아로부터 전자를 받아 음전극으로 수송한다고 가정되고 있다(Park et al., 2001; Rabaey et al., 2004; Schröder, 2007). 어떤 특정한 박테리아는 직접적으로 전자를 음전극으로 수송할 수 있는데, 이것은 전기화학적으로 활성적인 산화환원(redox) 효소(박테리아 외부 세포벽의 Cytochromes)에 의한 것이다. 일반적으로 *Shewanella* 와 *Geobacter* 와 같은 금속 환원 박테리아 그룹이 MFC 시스템에서 전기를 생산해 낼 수 있는 가장 적합한 미생물로 고려되고 있다(Bond and Lovley, 2003; Kim et al., 1999; Park et al., 2001; Ringeisen et al., 2006). Zhang 등(2006)

[†] To whom correspondence should be addressed.

swoa@wsu.ac.kr

의 연구에서, 산소 양극 MFC 시스템에서 *Escherichia coli* K-12 HB101이 전기적 활성을 가지는 미생물로 제안되기도 하였다.

본 연구에서는 두 가지 다른 구조의 MFCs를 적용 혹은 고안하여 그 효율을 비교 분석하였으며, 양이온 교환막의 유무에 따른 전기 에너지 생산에 대한 영향을 검토하였다. 두 시스템 모두 산소 양극이 적용되었으며, 부분적으로 전자 매개체(electron mediator)가 이용되었다. 또한 혐기성 상태에서 수소생산량을 증가시키기 위하여 수소생산박테리아(혐기성, 그람 양성, 포자형성 박테리아)의 접종이 검토되었다.

2. 연구 방법

2.1. 반응조 구조

두 가지 형태의 미생물 연료 전지가 제작되었다. 첫 번째, 단일반응조의 두 전극(음전극, 양전극)이 양이온 교환막(PEM, Nafion117)으로 결합된 형태의 (Single-chamber Combined Membrane Electrode, SCME) MFC 시스템이 제작되었다(Min and Logan, 2004; Fig. 1). SCME MFC는 방수기능의 아크릴 원통형으로 길이 14 cm, 직경 9 cm로 제작되었으며, 전체 용적은 890 mL이었다. 결합된 형태의 전극과 양 이온 교환막은 E-TEK(#MY022107)으로부터 구입되었고, 두 전극은 탄소로 이루어진 천 재질이었다(Vulcan XC-72). 음전극과 양전극은 20%의 백금(Pt) 촉매제를 사용하였고(0.5 mg/cm²), 구리선으로 연결되었으며 1,000 Ω의 외부저항이 사용되었다.

두 번째로 고안된 MFC는 한 반응조에 각각 두 개의 브러쉬타입 음전극과 산소 양전극을 가지는 형태로서 TBE (Twin compartment Brush type anode Electrode) MFC라 명하였다(Fig. 2). 반응조는 앞의 SCME MFC와 같이 긴 원통형으로 제작되었고, 전체 용적은 1.85 L이었다. 양전극은 30% 방수재질의 탄소천으로 촉매제인 10% 백금(Pt)이 사용되었고(type B-1B, E-TEK, # JJ041907), 브러쉬 타입의 음전극은 탄소섬유(PANEX35 50K, ZOLTEK)와 티타늄(titanium) 선을 이용하여 두께 6 cm, 길이 7 cm로 짜여졌다(Logan et al., 2007). 시스템의 수분 손실을 막기 위하여 또 다른 탄소천이 양전극 바깥부분에 더해졌으며(E-TEK,

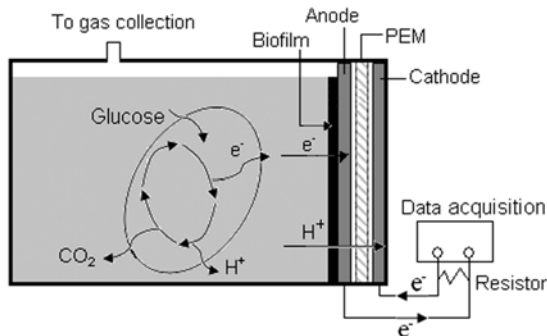


Fig. 1. A schematic of single chambered combined membrane electrode (SCME) microbial fuel cell (MFC) amended with glucose as a substrate.

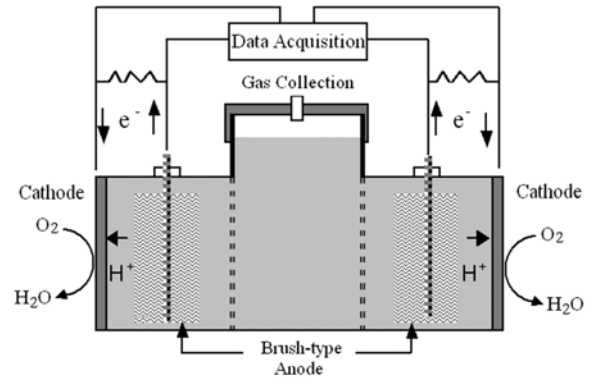


Fig. 2. A schematic of twin compartment brush typed electrode (TBE) microbial fuel cell (MFC) wired with 470 ohms of an external resistor.

#9644B-101107, designation B with 30% wet proofing), 두 전극 사이의 간격은 1 cm이었고(Cheng et al., 2006), 외부 저항은 470 Ω이었다. MFC는 반응조 내부의 양쪽 면에 다공성 플라스틱 재질의 방벽이 설치되었는데, 이는 멤브레인 표면의 미생물 막힘과 손실을 최소화하고, 시스템 내부의 laminar flow를 유지하기 위한 것이다. 기본적으로 두 시스템은 혐기성 미생물 기작에 의한 이산화탄소 등과 같은 가스성 부산물을 배출하기 위한 가스포집 장치가 포함되어 있었지만 본 연구에서 가스 분석은 수행하지 않았다.

2.2. 사용 기질

SCME MFC 실험에서 순수 화학물질인 글루코스가 기질로 사용되었다. 미량 영양물질(AlCl₃, H₃BO₃ 10 mg, CaCl₂·2H₂O 600 mg, CoCl₂·6H₂O 30 mg, CuCl₂·2H₂O 8 mg, FeCl₂·4H₂O 80 mg, MgCl₂·2H₂O 400 mg, MnCl₂·4H₂O 100 mg, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 10 mg, NiCl₂·2H₂O, NaSeO₃ 10 mg, ZnCl₂ 10 mg, HCl 0.2 ml per liter)이 제조되었으며, 1 g/L의 글루코스에 1 mL의 비율로 추가되었다(Heijne et al., 2006; Liu and Logan, 2004). 또한 우분 침출액(8,210 mgCOD/L)인 액상 폐수가 기질로 사용되었다. 우분은 농가의 세척수로부터 분리되어 스크린된 우분 더미로부터 2일 이내에 수집되었다.

TBE MFC 실험에서 5 g/L의 수크로스가 기질로 이용되었고, 미생물 합성을 위한 기타 영양분이 사용되었다. 0.31 g/L의 NH₄Cl, 0.13 g/L의 KCl, 미량 영양물질이 첨가되었고, 적정 pH를 위한 200 mM의 인산염인 완충용액이 사용되었다. 경우에 따라 6 mM의 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone (HNQ)이 전자 매개물질로 사용되었다.

2.3. 미생물 접종

SCME MFC 시스템에서는 다른 미생물의 접종은 이루어지지 않았고, 우분으로부터의 침출액을 기질로 사용한 경우, 침출액 내의 박테리아의 활동을 기대하였다. TBE MFC 시스템에 순수 배양된 수소발생 미생물(혐기성 그람 양성 포자형성 박테리아)이 접종되었는데, 미생물의 근본적인 배양은 열처리가 된 퇴비로부터 얻었고(pH 3.38), 실험실에서

제조된 media(0.50 g/L 효모추출물, 0.50 g/L 프로테오스 펩톤[Difco #3, 박토펙톤], 0.50 g/L 카사미노산[박토티립톤], 8.91 g/L 수크로스, 0.5 g/L 감자전분, 0.30 g/L 아세트산나트륨, 0.30 g/L K_2HPO_4 , 0.05 g/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 1 mL/L 유기산[LawnPro])에서 배양하였는데, 반응조 용량의 1%가 접종 되었다.

2.4. 분석 방법

운전기간 동안 pH(Cole-Parmer pH electrode probe)와 SCOD(HACH DR/890 colorimeter, reactor digestion method 8000)가 분석되었다. 샘플은 0.45 μm 의 멤브레인 필터에 의해 걸러졌으며, 전압은 multi-volt meter로 data acquisition 시스템(National Instruments LabVIEW 8.2.1)을 통해 분 단위로 기록되었다. 수집된 전압은 옴의 법칙($P=1000V^2/RA$)에 의거하여, 첨두(peak)전력량 혹은 최대(maximum)전력량(mW/m^2)으로 계산되었다. V는 전압(V), R은 저항(Ω), 그리고 A는 양극전극의 표면 면적(m^2)을 가리킨다. 본 연구에서 탄소 섬유 형태의 음전극 면적을 수치화하는데 정확성이 낮음으로 양전극 면적이 계산에 이용되었다.

3. 결과 및 고찰

SCME MFC에서 두 종류의 다른 기질을 사용하였는데, 글루코스(SCME1)와 우분으로부터의 침출액(SCME2)이 사용되었고, 회분식으로 운전되었다. 두 실험 모두에서 다른 미생물의 접종은 이루어지지 않았으며, 반응 조건 내에서 자연발생적인 미생물의 활동을 기대하였다. 약 72시간의 운전기간 동안 관찰된 전압과 분석된 COD 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. SCME1 MFC에서 발생된 평균 전압과 평균 전력량은 0.19 V, 8.8 mW/m^2 이었고, 발생된 첨두(peak) 전압과 이때의 전력량은 각각 0.34 V, 18.8 mW/m^2 이었다. 초기 주입된 글루코스의 농도(780 mgCOD/L)는 약 28% 감소되었다. 우분 침출액이 기질로 사용된 SCME2 MFC에서, 운전기간 동안 발생된 평균 전압은 0.38 V였고, 이때의 면적당 파워는 28.7 mW/m^2 로 계산되었다. 운전 초기단계에서 SCME2 MFC 시스템은 SCME1과 비교하여 높은 전압을 생산하였는데, 이는 고농도의 유기기질(8,210 mg/L)과 화학적 인공 기질(글루코스)과 다르게 침출수내에 자연발생적으로 존재하는 미생물의 즉각적인 활동으로 판단된다. 운전기간 동안 SCME1 시스템은 초기 적응 시간과 함께 일정시간 이후 전압 생산량과 유기물질이 감소된 반면, SCME2 시스템은 지속적인 전압 생산을 보였음에도 불구하고 SCOD는 일정하거나 혹은 증가하였다(Fig. 3(b)). 이는 우분 침출액의 기질 특성에 의한 것으로 혐기성 조건에서 발생된 휘발성지방산(아세트산, 프로피오닉산, 그리고 뷰틸산)의 생성으로 추측된다. SCME MFC 시스템의 운전을 통해 발생된 내부 저항은 각각 446 Ω (SCME1)과 570 Ω (SCME2)이었고, 이는 실측된 전압과 전류량으로부터 옴의 법칙(저항=전압/전류)에 의거하여 계산되었다.

SCME MFC를 실험한 결과, 이 시스템으로부터 전기 생

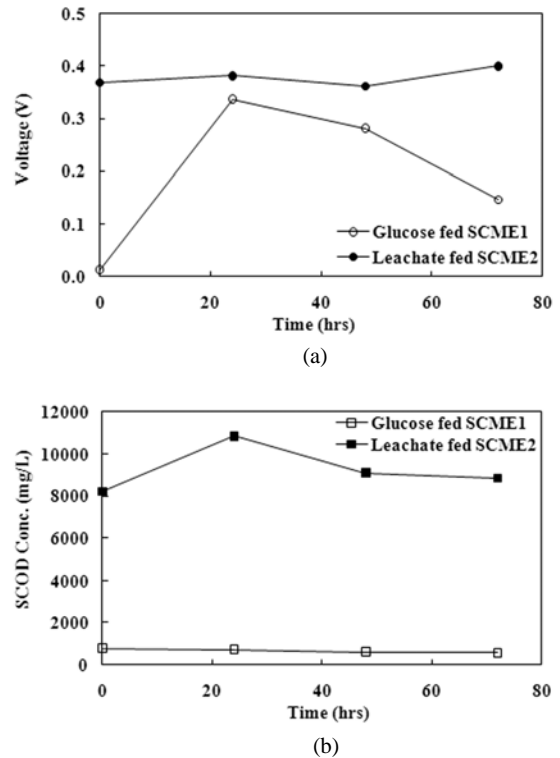


Fig. 3. Voltages (a) and COD (b) variations during the operating time amended with glucose (SCME1) or leachate (SCME2) as substrate in SCME MFC (cited from Lee et al., 2010).

산의 가능성을 확인하였고, 실 폐수(우분 침출액)를 적용한 경우에도 충분한 기질과 자연 발생적인 미생물의 공급으로부터 큰 효율을 보여주었으며, 추후 안정적이며 장기적인 전압 혹은 전력의 생산을 기대할 수 있었다.

새로운 형태의 브러쉬 타입 MFC(TBE)가 고안, 평가되었고, 이 시스템은 다음과 같이 가정되었다. 첫째, 브러쉬 타입의 음전극은 평평한 탄소전극에 비하여 상대적으로 큰 표면적을 가지므로, 더 큰 전압 혹은 전력 생산이 기대된다(Logan et al., 2007). 또한 브러쉬 타입의 전극은 백금(Pt)이 함유된 전극과 비교하여 시스템 용적을 증대할 경우 비용 면에서 더욱 효과적인 재료가 될 것이다. TBE MFC 시스템은 한 반응조 내부에 두 개의 산소 양극 전극을 가지므로 SCME MFC 시스템과 비교하여 더 큰 반응조용적당 양극 면적율로부터 효과적인 양극 반응이 기대되고, 이와 더불어 TBE MFC는 한 시스템 내에서 각기 다른 두 양전극과 음전극을 통하여 전압 수집이 가능하므로 결과적으로 일반적인 단일 반응조와 비교하여 두 배의 결과물을 산출할 수 있다. 마지막으로, TBE MFC는 양이온교환막(PEM, Nafion117)을 포함하지 않는 시스템이다. Liu and Logan(2004)의 연구에 의하면 양전극과 음전극의 거리가 가까울 때 PEM은 오히려 시스템의 효율을 저하시키는 것으로 나타났다. 따라서 TBE MFC 시스템은 내부의 자연 확산에 의한 수소와 전자의 전달 시스템이 PEM을 포함하는 시스템과 비교할 때 효과적인 전압 생산에 기여할 것이라고 가정되었다. 본 실험을 통하여 위의 가정들이 검토

Table 1. Comparison of the power densities according to different designs of MFC

Substrate/Cathode	MFC designs	*Power density (mW/m ²)	References
Domestic wastewater/air	S, C	26	Liu et al., 2004
Domestic wastewater/air	F	72	Min & Logan 2004
Domestic wastewater/air	S, B	146	Min et al., 2005
Glucose/manganese	T	126.7±31.5	Rhoads et al., 2005
Hospital wastewater/ferricyanide solution	S, C	48	Rabaey et al., 2005b
Meat packing wastewater/air	S, B	80	Heilmann & Logan, 2006
Glucose/oxygen	T	3.9	Rhoads et al., 2005
Leachate from cattle manure/air	S, B, SCME	37	This study
Sucrose/air	S, B, TBE	230.6	This study

B- batch; C- continuous; F- flat plate; S- single chamber; T- two chamber; leachate-leached from cattle manure; SCME-single compartment combined membrane electrode; TBE-twin compartment brush-type electrode; *Power density was calculated by cathode electrode area.

확인되었다. Table 1은 MFC의 구조와 반응 기질에 따른 타 연구자들의 전력 생산 결과를 정리한 것으로 본 연구에서 실험된 MFC의 구조 역시 전력 생산이 가능하였고, 고농도의 실패수를 적용할 경우 안정적인 기질의 공급으로부터 효율적인 전력 생산량이 기대되는 것으로 나타났다.

운전기간 동안에 TBE MFC의 한쪽 편에서(오른쪽) 수집된 전압과 COD의 변화를 Fig. 4에 나타내었는데, test1과 test2로 나누어 실험되었다. Test1은 5 gCOD/L의 수크로스가 주입되었으며, 운전 초기에 긴 적응 기간을 필요로 하였다. 이는 미생물 군집 형성을 위해 소요되는 시간으로 판단되며, 이때 발생된 침투 전압과 전력량은 각각 0.24 V, 14.9 mW/m²였다. Test1에 이어 test2는 보다 높은 12 gCOD/L의 수크로스가 기질로 사용되었는데, test2에서도 역시 적응

시간(lag time, 약 200시간)을 거친 후, 전압이 서서히 증가되어 약 0.3V에 도달되었다. 이후 약 200시간 동안 일정 전압을 발생시키다가 서서히 감소되었다. 이때 침투 전력량은 23.3 mW/m²이었다. Test2의 실험결과로부터 test1에서 보다 짧은 적응 기간과 더 높은 전압 발생량이 관찰되었는데, 이는 test1에서 보다 활성화된 미생물 군집의 형성과 충분한 기질의 공급에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 전압 발생량이 기질의 농도에 비해 한다가보다 일정 농도 이상의 기질이(약 4,000 mg/L) steady-state 상태를 유지하는데 영향을 미치는 것으로 판단되며, 두 실험에서 모두 COD는 전체 운전 기간에 걸쳐 서서히 감소되었다(Fig. 4(b)). 전 운전 기간에 걸쳐 pH는 6.3~6.9로 안정적으로 유지되었다.

위의 실험 결과를 바탕으로 SCME MFC 시스템과의 효율을 비교할 때, 전력발생당(SCME: 28.7 mW/m² vs. TBE: 23.3 mW/m²) 제작비용 면에서 고가의 백금(Pt)과 멤브레인에 포함된 Nafion117을 포함하지 않은 TBE MFC가 더 효과적인 구조인 것으로 판단된다. 또한 TBE MFC는 각각 두 개의 음전극과 양전극을 가지므로, 최종 전력 생산량은 발생된 전력량(23.3 mW/m²)의 약 두 배인 26.6 mW/m²의 전력량이 기대된다. 또한 TBE MFC에서 상대적으로 큰 표면적을 가지는 브러쉬 타입의 음전극이 전기 활성적 미생물의 성장과 군집에 효과적으로 작용되어 시스템의 적응 기간 이후 안정적인 에너지 생산 양상을 보였다.

TBE MFC를 이용하여 매개체(mediator)의 주입 유무에 따른 시스템의 전력 생산 효율도 함께 평가 되었는데, 그 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 두 MFCs 모두에서 5 g/L의 수크로스가 기질로 사용되었고, 적정 pH의 유지를 위해 200 mM의 인산염인 완충용액이 사용되었다. 운전 초기에 매개체로써 6 mM의 HNQ가 사용된 MFC에서 약 1일의 적응기간을 거친 후, 전압이 서서히 증가되기 시작하여 평균 0.34 V에 이르렀고, 침투 전압은 0.39 V에 도달하였다. 이때의 침투 파워는 40.1 mW/m²이었다. 한편, 매개체를 주입하지 않은 MFC 시스템에서는 현저히 낮은 반응속도를 보였으며, 시스템이 활성화되는데 앞의 실험에서와 같이 오랜 적응 기간(약 150시간 이상)을 가졌다. 이후 발생된 전압도 약 120 mV 이상의 현저한 차이를 보였다. 매개체가 없는 시스템에서 발생된 침투 전압은 0.26 V였고, 이로부터

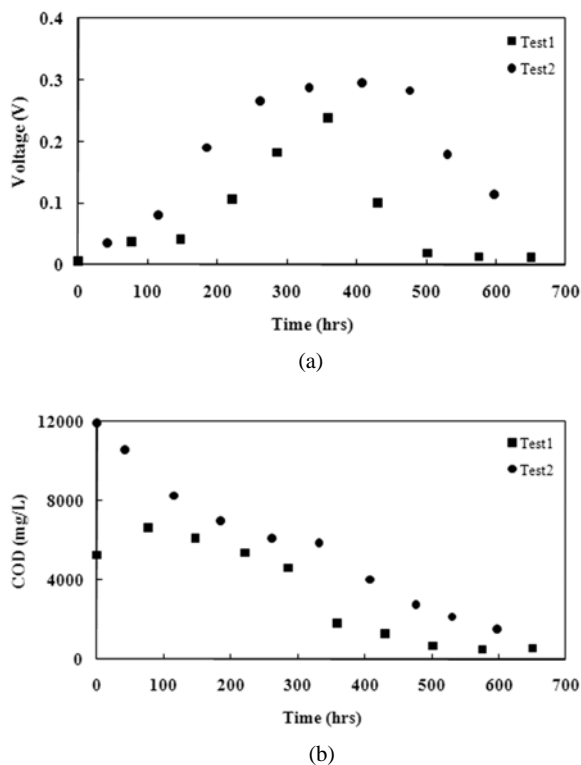


Fig. 4. Voltages (a) and COD (b) variations amended with 5 g/L of sucrose (Test1) and 12 g/L of it (Test2) in TBE MFC.

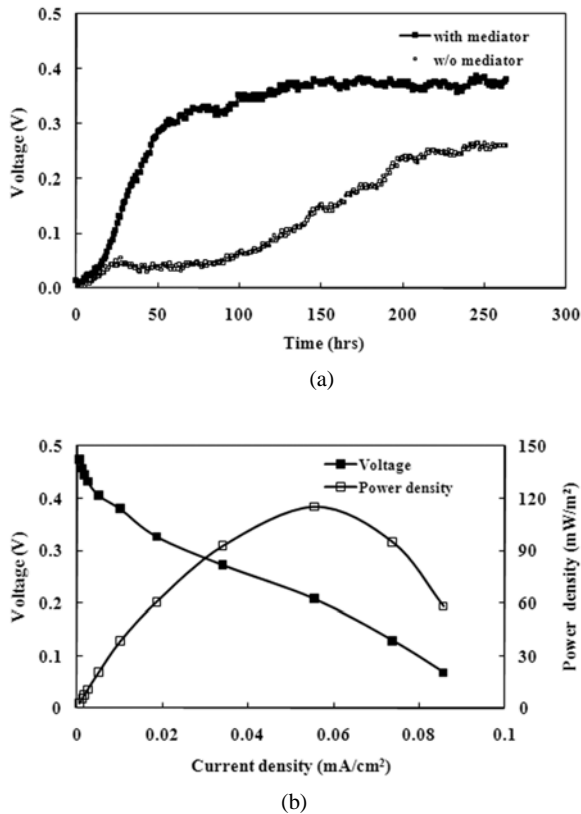


Fig. 5. Voltages variation (a) with and without a mediator (6 mM of 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone, HNQ), and polarization test (b) in TBE MFC(cited from Lee et al., 2010).

터 계산된 첨두 파워는 18.3 mW/m²로 매개체가 주입된 시스템과 비교하여 약 45%에 해당되는 효율을 보였다.

운전 기간 중 시스템으로부터의 최대 전력 생산량 도출을 위하여 polarization curve test가 수행되었다(Logan et al., 2006). 안정화된 상태의 시스템으로부터 일정한 전압이 발생할 때, 여러 종류의 외부 저항(10, 22, 47, 100, 220, 470, 1K, 2.2K, 3.3K, 4.7K, 10K Ω)으로부터 변화되는 전압의 양을 기록하였고, 외부 저항은 일차적으로 낮은 저항에서 높은 저항으로, 다시 높은 저항에서 낮은 저항으로 교환하며 전압을 기록하였다. 분석을 위한 데이터는 두 실험의 평균값을 사용하였는데, 변환은 순간적으로 이루어졌으며, 약 15분 정도의 안정화 시간을 거친 후 기록하였다. 이때 변화된 전압-전류-전력의 관계를 Fig. 5(b)의 그래프로 나타내었다. 외부저항에 따라 전압의 변화량은 비례하였으며, 전류는 반비례하였다. 이에 따른 전력은 전류의 흐름이 커짐에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며, 47 Ω의 외부저항에서 115.3 mW/m²의 최대 전력이 발생되었다.

4. 결론

서로 다른 구조의 미생물 연료 전지 공정이 고안되었고, 그에 따른 에너지 효율을 평가하였다. 고안된 두 시스템 SCME와 TBE MFC 모두로부터 전력의 생산이 가능하였

다. 안정된 에너지 생산을 위한 일정 농도 이상의 기질이 요구되었으며(약 4,000 mg/L), 그 이하의 농도에서는 기질의 제한으로부터 전압이 감소되는 경향을 보였다. 양이온 교환막이 사용되지 않은 TBE MFC의 경우 SCME MFC과 비슷한 전력 생산량(23.3 vs. 28.7 mW/m²)을 기록하였지만, 시스템적인 이점을 고려할 때 TBE MFC에서 약 두 배의 전력 생산을 얻었다. 또한 비용적인 면에서도 TBE MFC 공정이 보다 우수한 시스템으로 판단되어 진다. 전자 매개체를 사용했을 때, 약 2.2배의 첨두 전력 생산량을 얻었고, 이에 따른 최대 전력 생산량은 115.3 mW/m² (47 ohms의 외부저항)이었다. 이상의 결과로부터 매개체의 존재가 전자 전달의 효율을 증대시키는 것으로 판단할 수 있다.

참고문헌

- Bond, D. R. and Lovley, D. R. (2003). Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl. and Environ. Microbiol.*, **69**(3), pp. 1548-1555.
- Cheng, S., Liu, H., and Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, pp. 2426-2432.
- Davila, D., Esquivel, J. P., Vignes, N., Sanchez, O., Garrido, L., Tomas, N., Sabate, N., Campo, F. J., Munoz, F. J., and Mas, J. (2008). Development and optimization of microbial fuel cell. *J. of New Materials for Electrochem. Systems*, **11**, pp. 99-103.
- Heijne, A. T., Hamelers, H. V. M., Wilde, V. D., Rozendal, R. A., and Buisman, C. J. N. (2006). A bipolar membrane combined with ferric iron reduction as an efficient cathode system in microbial fuel cells. *Environ. Sci. Tech.*, **40**, pp. 5200-5205.
- Heilmann, J. and Logan, B. E. (2006). Production of electricity from proteins using a microbial fuel cell. *Water Environment Research*, **78**(5), pp. 531-537.
- Kim, B. H., Kim, H. J., Hyun, M. S., and Park, D. H. (1999). Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *J. Microbiol. Biotechnol.*, **9**, pp. 127-131.
- Lee, Y. H., Khandan, N. N., and Oa, S. W. (2010). Bioelectricity production using microbial fuel cells in optimized configuration. *Proceedings of IWA World Water Congress and Exhibition*, Montreal, Canada. (selected).
- Liu, H. and Logan, B. E. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environ. Sci. Technol.*, **38**, pp. 4040-4046.
- Liu, H., Ramnarayanan, R., and Logan, B. E. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.*, **38**, pp. 2281-2285.
- Logan, B. E., Cheng, S., Watson, V., and Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased production in air-cathode microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.*, **41**, pp. 3341-3346.

- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., and Rabaey, K. (2006). Critical review- microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), pp. 5181-5192.
- Min, B., Cheng, S., and Logan, B. E. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Wat. Res.*, **39**, pp. 1675-1686.
- Min, B. and Logan, B. E. (2004). Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.*, **38**, pp. 5809-5814.
- Park, H. S., Kim, B. H., Kim, H. S., Kim, H. J., Kim, M., Chang, I. S., Park, Y. K. and Chang, H. I. (2001). A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium* isolated from a microbial fuel cell. *Anaerobe*, **7**, pp. 297-306.
- Picioreanu, C., Head, I. M., Katuri, K. P., Loosdrecht, M. C. M. V., and Scott, K. (2007). A computational model for biofilm - based microbial fuel cells. *Water Research*, **41**, pp. 2921-2940.
- Rabaey, K., Boon, N., Höfte, M., and Verstraete, W. (2005a). Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells. *Environ. Sci. Technol.*, **39**(9), pp. 3401-3408.
- Rabaey K., Boon, N., Siciliano, S. D., Verhaege, M., and Verstraete, W. (2004). Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Appl. Environ. Microbiol.*, **70**, pp. 5373-5382.
- Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., and Verstraete, W. (2005b). Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. *Environ. Sci. Technol.*, **39**(20), pp. 8077-8082.
- Rhoads, A., Beyenal, H., and Lewandowski, Z. (2005). Microbial fuel cell using anaerobic respiration as an anodic reaction and biomineralized manganese as a cathodic reactant. *Environ. Sci. Technol.*, **39**(12), pp. 4666-4671.
- Ringeisen, B., Henderson, E., Wu, P. K., Pietron, J., Ray, R., Little, B., Biffinger, J. C., and Jones-meehan, J. M. (2006). High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, pp. 2629-2634.
- Schröder, U. (2007). Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **9**, pp. 2619-2629.
- Zhang, T., Cui, C., Chen, S., Ai, X., Yang, H., Shen, P., and Peng, Z. (2006). A novel mediatorless microbial fuel cell based on biocatalysis of *Escherichia coli*. *Chem. Commun.*, pp. 2257-2259.
- Zhang, X and Halme, A. (1995). Modeling of microbial fuel cell process. *Biotechnol. Lett.*, **17**(8), pp. 809-814.