

미생물연료전지에서 공급기질에 따른 전기발생량 및 미생물 군집구조 비교

유재철 · 조해인 · 조순자 · 이태호[†]

부산대학교 사회환경시스템공학부

Comparison of Electricity Generation and Microbial Community Structure in MFCs Fed with Different Substrates

Jaechul Yu · Haein Cho · Sunja Cho · Taeho Lee[†]

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

(Received 3 February 2010, Revised 4 May 2010, Accepted 4 May 2010)

Abstract

Electricity generation of microbial fuel cells (MFC) is greatly affected by the kind of feed substrates because substrates would change microbial community of electrochemically active bacteria (EAB) able to transfer electrons to electrode. The effect of different substrates on electricity generation and microbial community of MFC was investigated. Two-chamber MFCs fed with acetate (A-MFC), butyrate (B-MFC), propionate (P-MFC), glucose (G-MFC) and a mixture (M-MFC) of the 4 substrates (acetate : butyrate : propionate : glucose = 1 : 1 : 1 : 1 as COD_C base) were operated under continuous mode. The maximum power density was found from the M-MFC (190 W/m³) which showed the lowest internal resistance (89 Ω). The maximum power densities of the pure substrates feed MFCs were in order of A-MFC (25 W/m³), P-MFC (21 W/m³), B-MFC (20 W/m³) and G-MFC (9 W/m³). In DGGE analysis, the microbial community structure in suspension was quite different from each others depending on feed substrates, while the community structure in the biofilm was relatively similar regardless of the substrates. This result suggests that the feed substrates would affect the microbial community of suspended growth bacteria than attached growth bacteria resulting in difference of electricity generation in MFCs.

keywords : Electrochemically active bacteria, Microbial community structure, Microbial fuel cell, Substrate

1. 서론

미생물연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC)는 미생물에 의한 유기물의 분해반응을 통해서 전기를 생산하는 장치로서, 하·폐수와 유기성 폐기물을 처리하며 전기에너지회수가 가능하다. 산화전극부에서는 미생물에 의해 유기물이 분해되면서 전자와 수소이온이 발생하고, 산화전극부에서 생성된 수소이온은 수소이온교환막(Proton Exchange Membrane, PEM)을 통해 환원전극으로 이동하고, 전자는 외부회로를 통해 환원전극부로 이동한다. 환원전극부로 이동한 수소이온 및 전자는 전자수용체인 산소와 반응하여 물을 생성한다. 이 과정에서 발생하는 연속적인 전자의 흐름을 통해서 전기에너지를 회수한다(Bond et al., 2002; Oh et al., 2004).

하지만 MFC에서 생성되는 전기발생량은 기질의 종류 및 농도, 미생물의 종류, 이온강도, pH, 온도, 반응기 구조 등과 같은 다양한 요인에 영향을 받는다(Tender et al., 2002; Delong and Chandler, 2002). 특히 기질 종류와 미생물 종류는 MFC의 전기생산량에 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. Liu 등(2005)은 아세테이트를 기질로 공급한 MFC의

전력밀도량은 506 mW/m²였으며, 뷰틸레이트를 기질로 공급한 경우에는 305 mW/m²으로 기질의 종류에 따라 다르게 나타난다고 보고하였다.

일반적으로 기질의 농도가 증가하면 MFC의 전기발생량이 증가하는 것으로 알려져 있으며, 축산폐수, 주정폐수, 일반하수, 침출수 등 다양한 종류의 하폐수를 기질로 이용할 수 있는 것으로 알려져 있다(Du et al., 2007). 또한 기질의 종류는 전기발생량 뿐만 아니라 산화전극부의 미생물 군집에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. Jung and Regan (2007)은 아세테이트, 락테이트, 글루코스를 각각 기질로 공급한 MFCs의 전기발생량은 다르게 나타났으며, 전기활성박테리아로 널리 알려진 *Geobacter* sp. 관련 종들이 공통적으로 발견되었지만, 기질종류에 따라서 전체적인 미생물 군집구조는 다르다고 보고하였다. Chae 등(2009)도 아세테이트, 뷰틸레이트, 프로피오네이트, 글루코스를 각각 기질로 공급한 MFCs의 전기발생량과 미생물 군집이 다르게 나타난다고 보고하였다.

MFC는 생물막 공정에 기반을 둔 공정으로, 발생하는 전력은 전극 표면적과 미생물의 상호 작용에 의해 많은 영향을 받게 되므로 생물막을 구성하고 있는 미생물 군집, 특히 전기활성미생물(Electrochemically Active Bacteria, EAB)을 이해하는 것은 매우 중요하다(Logan et al., 2006;

[†] To whom correspondence should be addressed.
leeth55@pusan.ac.kr

Reguera et al., 2006; Rozendal et al., 2008). 일반적으로 산화전극부에서는 미생물에 의한 유기물의 산화가 일어나고, 그 과정에서 발생하는 전자가 전극 표면으로 이동하기 위해서는 전극 표면의 부착미생물이 전자 전달에 효율적이라고 여겨져 왔으며, MFC의 전극 표면에 40-50 μm의 생물막이 발견되었다(Reguera et al., 2006). 하지만 최근 연구에 의하면, 대표적인 전기활성 박테리아인 *Geobacter sulfurreducens* PCA, *Shewanella oneidensis* MR-1 그리고 *Synechocystis* PCC6803 등은 떨어져 있는 전자 수용체에게 전자를 전달할 수 있다는 것이 밝혀졌다(Gorby et al., 2006; Logan and Regan, 2006; Rozendal et al., 2008).

실제 하폐수는 단일기질이 아닌 여러 가지 탄소원이 복합적으로 구성되어 있어, 복합기질을 이용하는 MFC에 관한 연구가 필요하다. 특히 복합기질이 단일기질과 비교하여 전기생산에 얼마나 유리한지, 그리고 전기를 생성하는 미생물 군집은 얼마나 다른지에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 또한 지금까지 다양한 종류의 기질을 이용한 MFC 연구에서, 부유 미생물과 부착 미생물을 구분하여 해석한 보고는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 발효 과정의 초기 물질인 글루코스와 부산물인 뷰틸레이트, 프로피오네이트, 아세트이트와 이들을 혼합한 복합탄소원을 기질로 주입하는 MFC에서 전력 발생량과 부유 및 부착 미생물 군집을 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 미생물 연료전지 구성 및 운전

본 연구에는 사용된 MFC는 Fig. 1에 나타난 것처럼, 아크릴로 제작된 산화전극부와 환원전극부로 구성되어 있으며, 수소이온교환막(Nafion 117, Dupont Co., USA)으로 분리되어있다. 각 전극부의 유효부피는 18 mL(30×60×10 mm)이며, graphite felt를 산화전극과 환원전극으로 사용하였다. 각각의 MFC는 산화전극과 환원전극이 외부에서 연결되지 않은 조건(열린회로)과 전선을 이용하여 외부에서 연결한 조건(닫힌회로)으로 운전되었다(유재철과 이태호, 2009). 산화전극부에는 부산시 수영하수처리장의 혐기조 소화 슬러

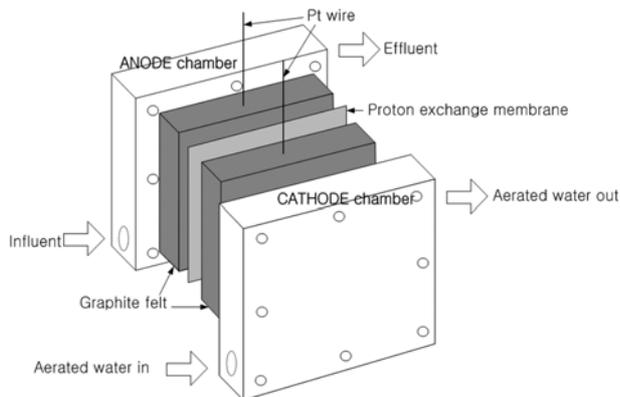


Fig. 1. Schematic diagram of two-chamber MFC used in this study.

지를 식중하여, 혐기성 조건으로 운전하였다. 각 반응조의 기질은 하부 유입구를 통해서 주입되어 상부 유출구를 통해서 배출되었다. 산화전극부와 환원전극부의 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)는 각각 5시간, 9분이었으며, 외부저항은 200 Ω, 운전온도는 25°C이었다.

2.2. 기질변화에 따른 배지조성

MFC 산화전극부에는 글루코스, 프로피오네이트, 뷰틸레이트, 아세트이트를 단일기질로 이용하였으며 4개의 탄소원이 COD 기준으로 동일한 비율(글루코스:프로피오네이트:뷰틸레이트:아세트이트=1:1:1:1)로 혼합된 기질을 혼합기질로 주입하였다. 이때 기질농도는 COD 기준으로 680 mg/L이었다. 그리고 환원전극부에는 폭기된 수돗물을 공급함으로써 용존산소가 전자수용체로 이용될 수 있도록 하였다.

탄소원을 제외한 배지의 조성은 K₂HPO₄ 3.4 g/L, NH₄Cl 0.2 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO₄·7H₂O 0.2 g/L, KH₂PO₄ 4.4 g/L, trace elements 1 mL/L이었고, 각 반응기의 기질농도는 아세트이트(CH₃COONa) 1 g/L, 글루코스(C₆H₁₂O₆) 0.641 g/L, 뷰틸레이트(CH₃(CH₂)₂COONa) 0.587 g/L, 프로피오네이트(CH₃CH₂COONa) 0.586 g/L, 복합 기질의 경우, 아세트이트(CH₃COONa)는 0.171 g/L, 글루코스(C₆H₁₂O₆)는 0.160 g/L, 뷰틸레이트(CH₃(CH₂)₂COONa)는 0.147 g/L, 프로피오네이트(CH₃CH₂COONa)는 0.146 g/L를 사용하였다.

2.3. 분석 방법

2.3.1. 화학적 분석 및 전기화학분석

MFC의 산화전극부 유출수의 COD_{Cr} 농도는 AA3(Bran+Luebbe-Auto analyzer 3, SPX Corporation, Germany)를 이용하여 분석되었다. 온도는 온도계를 이용하여, 환원전극부 유입수의 용존산소 농도는 DO meter(YSI 550A, YSI incorporated, USA)를 이용하여 매일 2회 측정하였다.

MFC에서 발생하는 전압은 매 200초마다 Data Acquisition System(model 7799, Keithley instruments Inc., USA)으로 측정하였다. 그리고 각 기질 조건에서 저항(10~5000 Ω)을 달리하며 전압의 변화를 측정하였으며, 최대 전압 및 전류를 계산하였다. 전력 밀도는 식 (1)을, 쿨롱 효율은 식 (2)를 통해 계산되었다.

$$P = \frac{V \cdot I}{V_{An}} \quad (1)$$

$$C_E = \frac{8 \cdot I}{Fq\Delta COD} \times 100 \quad (2)$$

- P : 전력밀도 (W/m³)
- C_E : 쿨롱효율 (%)
- V : 전압 (V)
- V_{An} : 산화전극부 부피 (m³)
- I : 전류 (A)
- ΔCOD : COD변화량 (g/L)

F : 패러데이 상수 (96,500C/mole)
 q : 유량 (L/sec)

2.3.2. 산화전극부내 미생물 균집해석

부유미생물 균집 분석을 위해서 각 기질을 공급한 열린 회로와 닫힌회로 MFC로부터 3일에 한 번씩 유출수내 미생물을 채취하였으며, 운전 종료 후에 산화전극표면의 생물막을 채취하여 부착미생물 균집을 분석하였다. 채취된 시료는 원심분리(3,000 rpm)를 5분간 실시하였으며, 상등수를 제거하고 침전된 미생물은 DNA 추출실험 때까지 -80°C에 보관하였다. Powersoil™ DNA Isolation kit (MoBio Ltd., Co., USA)를 이용하여 DNA를 추출하였으며, 추출된 DNA로부터 박테리아의 16S rDNA를 polymerase chain reaction (PCR) 증폭하였다(Table 1). PCR 용액의 조성은 10×Taq buffer 2.5 μL, 10 mM dNTP 10 μL, 각각의 primer 0.25 μL (10 pmol), DNA template 2 μL, Taq(or hot taq) DNA polymerase(Solgent Co., Korea) 0.125 μL이었으며, 증류수를 첨가하여 총 부피가 50 μL가 되도록 제조하였다. 모든 PCR 산물은 1% agarose gel에서 전기영동 후, ethidium bromide (0.5 mg/L)로 염색하여 확인하였으며, 정제 kit (PCR purification kit, SolGent Co., Korea)를 이용하여 정제하였다.

Denaturing gradient gel electrophoresis(DGGE)는 8% acrylamide gel에 urea와 formamide를 변성제로 첨가하여 30~60%의 농도구배가 있는 acrylamide 겔을 제조하여 실시하였다. 각 운전조건의 PCR 산물 40 μL을 각각 겔에 주입한 후 D-code system(model 475 Gradient delivery system, Bio-Rad laboratories, Inc., USA)을 이용해서 20 V에서 15분간 전기영동 후, 200 V에서 6 시간동안 전기영동을 수행하였다. DGGE band profile은 Ultraviolet transilluminator (UVitec gel documentation system, Cambridge, UK)를 이용하여 확인하였으며 디지털카메라(Olympus 720 UZ, Olympus Optical Co. LTD., Japan)로 촬영하였다. Fingerprinting Informatrix(Bio-Rad, Hercules, CA, USA)를 이용해서 촬영된 DGGE band profile로부터 각 band의 위치와 명도를 수치화하였으며, SPSS 14.0(SPSS Inc, Chicago, IL, USA)을 이용하여 주성분분석(Principle Components Analysis, PCA)을 실시함으로써 각 운전조건의 band profile의 유사성을 시각화하였다. PCA는 관찰된 여러 변수들중에서 서로 연관성이 있는 변수들끼리 선형 결합형태로 묶어 몇 개의 잠재 변수로 변수를 축약하는 기법이다(이준호와 박갑성, 2008).

Table 1. Primer and PCR conditions used in this study

Primer	Sequence (5' to 3')	PCR conditions	Target
Eub 8F	AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG	9 min 95°C, followed 30 cycle of 1 min at 95°C, 1 min 53°C, 2 min 72°C followed by a 10 min final extension at 72°C	Bacteria 16S rDNA
Eub 1392R	ACG GGC GGT GTG TAC AAG		
Eub 341F(GC)	CCT ACG GGA GGC AGC AG	9 min 95°C, followed 35 cycle of 1 min at 95°C, 1 min 55°C, 2 min 72°C followed by a 10 min final extension at 72°C	Bacteria V3 region
Eub 518R	ATT ACC GCG GCT GCT GG		

F: forward primer, R: reverse primer, and GC : GC clamp(CGC CCG CCG CGC GCG GCG GGC GGG GCG GGG GCA CGG GGG G) was attached to the 5' end

3. 결과 및 고찰

3.1. 전기화학적 특성비교

3.1.1. 기질종류에 따른 전기발생량

각 기질조건의 MFC에서 생산된 전기량을(외부저항 200 Ω) Fig. 2에 나타내었다. 혼합기질을 공급한 M-MFC의 전기발생량은 평균 779 mV(325 mA/m²)로 가장 높게 나타났으며, 단일기질을 공급한 A-MFC, B-MFC, P-MFC, G-MFC의 전압발생량은 254 mV(105 mA/m²), 153 mV(64 mA/m²), 185 mV(77 mA/m²), 123 mV(51 mA/m²)로 아세테이트를 공급한 MFC에서 가장 높게 나타났다. 발효과정의 최종산물인 아세테이트는 전기활성미생물이 가장 쉽게 이용할 수 있는 탄소원이기 때문에, 아세테이트를 기질로 공급한 MFC의 전기발생량이 높은 것으로 알려져 있다(Bond et al., 2002). 아세테이트(506 mW/m²)를 기질로 공급한 MFC의 전기발생량이 뷰틸레이트(305 mW/m²)를 기질로 공급한 MFC보다 66% 높다고 보고되었으며(Liu et al., 2005), Jung and Regan(2007)은 아세테이트를 기질로 공급한 전지의 전류밀도는 349±13 mA/m²으로 글루코스를 기질로 공급한 전지(292±28 mA/m²)보다 높은 값을 나타낸다고 보고하였다. Chae 등(2009)도 아세테이트(200~250 mV)를 기질로 공급한 MFC의 전기발생량이 글루코스(150 mV)를 기질로 공급한 경우 보다 높게 나타났다고 보고하였다.

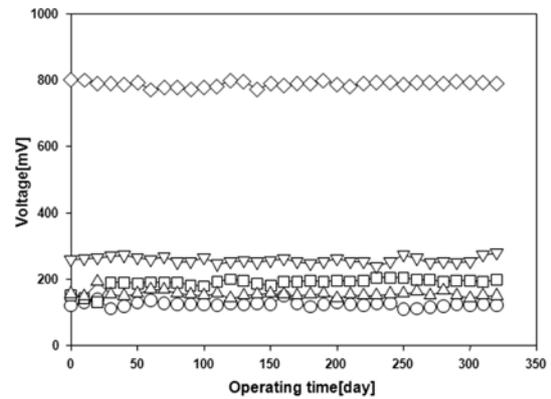


Fig. 2. Voltage generated from different substrate fed MFCs under continuous mode; ▽: A-MFC, □: P-MFC, △: B-MFC, ○: G-MFC, ◇: M-MFC.

3.1.2. 기질종류에 따른 전력밀도 및 내부저항

각 기질 조건에서 외부저항(10~5,000 Ω)을 달리하며 전

류변화에 따른 전압 및 전력밀도를 측정하였다(Fig. 3(a)와 (b)). 단일기질을 공급한 A-MFC, B-MFC, P-MFC, G-MFC의 최대 전력밀도는 각각 25, 20, 21, 9 W/m³으로 아세트이트를 기질로 공급한 MFC가 가장 높게 나타났으며, 혼합기질을 공급한 M-MFC의 최대 전력밀도는 190 W/m³으로 A-MFC보다 8배 이상 높게 나타났다(Fig. 3(b)). MFC의 전압-전류곡선의 기울기로부터 각 조건의 MFC의 내부저항을 산출한 결과(Logan, 2007), 단일기질을 공급한 A-MFC ($y=-144.31x+548.35$), B-MFC ($y=-184.69x+555.37$), P-MFC ($y=-166.89x+563.89$), G-MFC ($y=-327.21x+451.71$)의 내부저항은 각각 약 144, 185, 167, 327 Ω으로 나타났으며,

M-MFC ($y=-89.09x+1037.72$)의 내부저항은 89 Ω으로 가장 낮게 나타났다(Fig. 3(a)). 따라서 M-MFC의 내부저항이 가장 낮은 이유는 명확하지 않지만, 낮은 내부저항 덕분에 M-MFC의 전기발생량이 가장 높게 나타난 것으로 생각된다.

3.1.3. 기질종류에 따른 쿨롱 효율

각 기질조건의 MFC, A-MFC, B-MFC, P-MFC, G-MFC, M-MFC의 평균 쿨롱 효율은 각각 25, 24, 14, 10, 89%로 나타났다(Table 2). M-MFC의 쿨롱효율이 가장 높은 이유는 상대적으로 낮은 내부저항으로 인하여 전자의 손실이 적었기 때문인 것으로 판단된다. G-MFC에서 COD제거율은 가장 높았지만 쿨롱효율은 가장 낮았는데, Chae 등(2009)에 의하면 글루코오스를 기질로 공급한 MFC의 쿨롱 효율이 낮은 이유는 다양한 발효미생물과 메탄생성균이 우선적으로 기질(글루코오스)을 소모하기 때문이라고 한다. Lee 등(2008)도 글루코오스가 기질로 공급된 MFC에서는 초기 COD의 3.7%가 메탄으로 전환되었지만, 아세트이트가 기질로 공급된 MFC에서는 메탄이 거의 생성되지 않았다고 보고하였으며, 이러한 결과는 전기활성박테리아가 *acetoclastic methanogen* 보다 우선적으로 아세트이트를 기질로 이용하기 때문이라고 주장하였다. 따라서 본 실험에서 G-MFC와 A-MFC의 유기물 제거율은 각각 67, 69%로 유사하였지만, 쿨롱효율은 G-MFC(10%)가 A-MFC(25%)에 비해 2배 이상 낮았던 이유는 G-MFC에서 상대적으로 내부저항이 높았으며, 메탄생성 박테리아 및 발효 박테리아에 의한 전자의 소모가 더 많았기 때문인 것으로 사료된다.

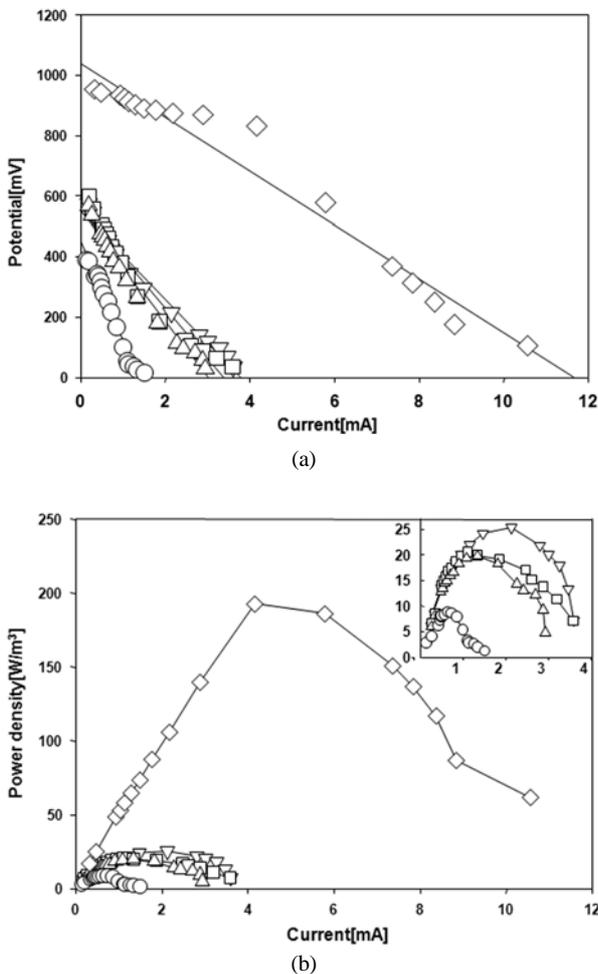


Fig. 3. Polarization (a) and power density (b) curves obtained from A-MFC, P-MFC, B-MFC, G-MFC and M-MFC; ∇: A-MFC, □: P-MFC, △: B-MFC, ○: G-MFC, ◇: M-MFC.

3.2. 기질 종류에 따른 미생물 군집

일반적으로 PCR-DGGE법은 조건변화에 따른 미생물군집의 변화를 시각화하고 조건변화에 따라 사라지거나 새롭게 등장하는 미생물종을 파악하기 위하여 사용된다. DGGE gel 상에 나타나는 각 band는 서로 다른 16S rDNA 염기서열을 가진 미생물종이며, 특정 미생물종이 증가할수록 특정 band의 명도 또한 증가하게 된다. 각 기질조건의 MFC에서 열린회로와 닫힌회로일 때의 DGGE band profile를 비교해보면, 전자가 흐르는 닫힌회로에서 부유미생물군집의 경우 band SGB 1, SGB 2, 그리고 부착미생물군집의 경우 band AGB 1, AGB 2와 같은 특정 band의 선명도가 강해졌기 때문에, 각 기질을 공급한 닫힌회로의 MFC에서 전자전달에 관여하는 미생물들이 우점화한 것으로 판단된다(Fig. 4).

각 기질별 DGGE band profile을 살펴보면, 공급된 기질의 종류에 따라 미생물 군집이 다르게 형성되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4). G-MFC에서 상대적으로 다양한 미생물

Table 2. MFC performance test using acetate, butyrate, propionate, glucose, mixed substrates as carbon sources; A-MFC: acetate fed MFC, B-MFC: butyrate fed MFC, P-MFC: propionate fed MFC, G-MFC: glucose fed MFC, M-MFC: mixed substrate fed MFC

	A-MFC	B-MFC	P-MFC	G-MFC	M-MFC
COD removal efficiency (%)	67	35	56	69	54
Maximum power density (W/m ³)	25	20	21	9	190
Coulombic efficiency (%)	25	24	14	10	89

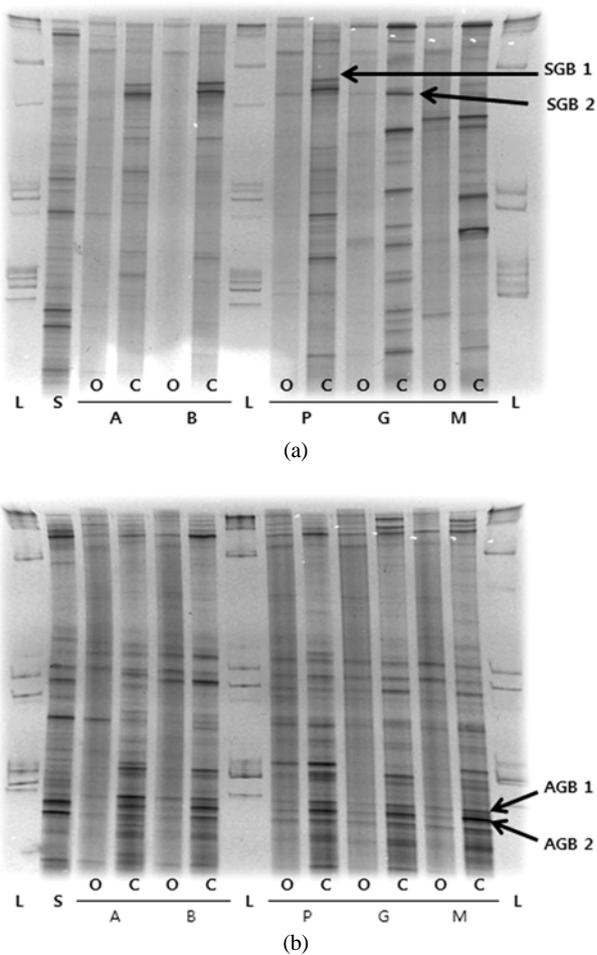


Fig. 4. DGGE profile of suspended (a) and attached (b) growth bacteria of anode compartment from MFCs fed with different substrates; O: open circuit, C: closed circuit, S: seeding sludge, L: DGGE ladder, A: A-MFC, B: B-MFC, P: P-MFC, G: G-MFC, M: M-MFC, SGB: suspended growth bacteria and AGB: attached growth bacteria.

들이 관찰되었지만, 전자전달 능력이 없는 발효미생물들이 함께 우점되었기 때문에 전기발생량이 가장 낮게 나타난 것으로 사료된다. Chae 등(2009)도 글루코스를 공급한 MFC의 전기발생량은 아세테이트를 공급한 MFC보다 낮았지만, 상대적으로 다양한 미생물이 관찰되었다고 보고하였다.

달린회로 MFC의 산화전극부 DGGE band의 위치 및 명도를 수치화하고 그 값들을 이용하여 DGGE band profile의 유사성을 시각화하기 위한 주성분분석을 실시하였다. MFC에 공급된 기질 종류에 따른 부유미생물군집은 서로 분산되어 나타나 유사성이 낮은 것으로 판단되었으나, 부착미생물군집의 경우에는 유사성이 높은 2개의 그룹으로 나뉘짐을 알 수 있었다. 하나의 그룹은 다양한 분해산물을 생성할 수 있는 기질을 공급하였던 G-MFC와 M-MFC의 미생물군집이 형성하였으며, 다른 그룹에는 비교적 단순한 기질을 공급한 A-MFC, B-MFC, P-MFC가 서로 유사한 미생물군집을 형성하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 따라서 전체적으로 볼 때 부착미생물군집이 부유미생물 군집에 비하여

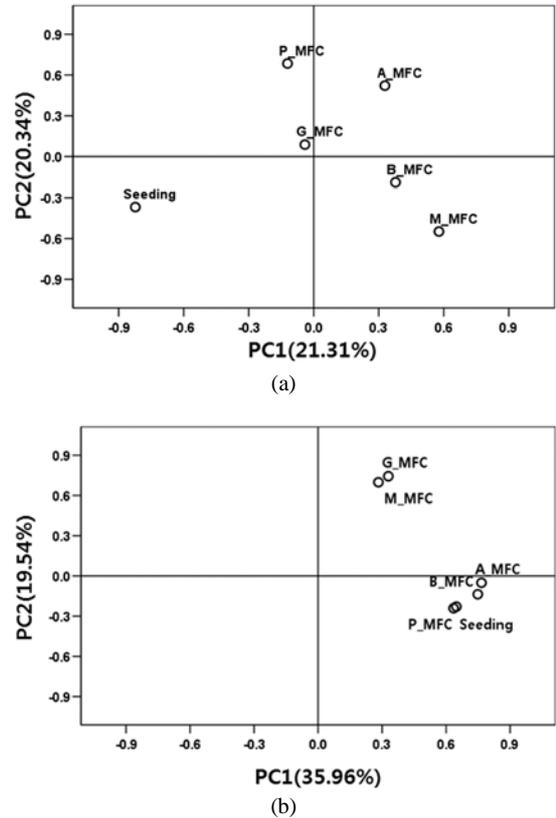


Fig. 5. Principle component analysis based on DGGE profiles of suspended growth bacteria (a) and attached growth bacteria (b) from MFC(closed circuit) fed with different substrates under a continuous mode; A-MFC: acetate fed MFC, B-MFC: butyrate fed MFC, P-MFC: propionate fed MFC, G-MFC: glucose fed MFC, M-MFC: mixed substrate fed MFC.

상대적으로 유사한 것으로 판단되며, 특히 단순기질을 공급한 MFC에서 부착 성장하는 전기활성미생물군집은 서로 상당히 유사한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 공급되는 기질에 따라 전기 발생량에 차이가 발생하였으므로, 부착미생물뿐만 아니라 부유미생물의 군집도 전기 발생에 중요한 역할을 수행하는 것으로 판단된다. Shimoyama 등(2009)도 카세트 형태 MFC(CE-MFC)운전 결과, 상대적으로 부유미생물의 단백질 함량이나 rRNA gene 숫자가 더 높게 나타났으며, 부유 미생물이 전기 생산에 중요한 역할을 수행한다고 보고하였다. Schroder(2007)는 전자를 직접 전극으로 전달하는 부착미생물의 경우, 쿨롱효율은 높지만, 전력발생량이 낮으며, 매개체 등을 이용해서 전자를 전달하는 부유미생물의 경우, 쿨롱효율은 낮지만, 전력발생량이 높기 때문에 어떠한 미생물이 MFC에 더 효율적인가에 대해서는 명확한 답을 내릴 수 없다고 보고하였다. Zhi 등(2008)도 부유미생물이 있는 MFC의 전기발생량 및 쿨롱 효율은 각각 0.43~0.47 V 및 3.5~3.9%로 안정적인 값을 보였으나, 부유미생물을 제거한 MFC의 전기발생량 및 쿨롱 효율은 0.45~0.65 V 및 1.5~4.3%로 불안정한 값을 보였으며, 현장 적용시 안정적인 전기발생량을 확보하기 위해서는 부유미생물이 필요하다고 보고하였다.

4. 결론

산화전극부에는 아세테이트, 뷰틸레이트, 프로피오네이트, 글루코오스 그리고 4 가지 기질을 모두 혼합한 기질을 전자공여체로 연속 공급하고, 환원전극부에는 용존산소를 전자수용체로 이용하는 MFC에서 기질 종류에 따른 전기 발생량과 미생물 군집구조를 분석하였으며, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) MFC의 최대 전력밀도의 크기는 M-MFC > A-MFC > P-MFC > B-MFC > G-MFC 순서였으며, 이는 M-MFC의 내부저항 값이 가장 낮았기 때문에 최대전력을 나타낼 수 있었고, 혼합 기질에 적응한 전기활성 미생물들이 다양한 대사작용을 통해 전자를 전달함으로써 전기발생량이 높았던 것으로 판단된다.
- 2) PCR-DGGE를 통한 미생물 군집 분석 결과, 기질별로 부속 미생물의 군집은 큰 차이가 없는 반면 부유 미생물의 군집은 상대적으로 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 각 기질별 전기 생산량이 서로 차이가 있었던 것을 고려할 때, 본 연구에서는 부유 미생물도 전기발생량에 중요한 영향을 끼치는 것으로 판단된다.
- 3) 유입유기물의 대사과정 동안 기질의 농도변화 양상과 그에 따른 전기 발생량 및 전기활성 미생물 군집의 변화를 보다 세밀하게 조사한다면, MFC를 이용하여 하폐수에서 최대의 전기를 생산하기 위한 최적 미생물 군집의 확보가 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역 혁신인력양성사업과 환경부의 폐기물에너지화 특성화대학원사업의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- 유재철, 이태호(2009). 환원전극부 DO 농도에 따른 단일 및 직렬연결 미생물연료전지 전기발생량 평가. *대한환경공학회지*, **31**(4), pp. 249-255.
- 이준호, 박갑성(2008). 유류오염대수층 고온공기분사공정시 제한효소다형성 미생물 군집. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(1), pp. 19-29.
- Bond, D. R., Holmes, D. E., Tender, L. M., and Lovley, D. R. (2002). Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments. *Science*, **295**(5554), pp. 483-485.
- Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y., and Kim, I. S. (2009). Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, **100**, pp. 3518-3525.
- Delong, E. F. and Chandler, P. (2002). Power from the deep. *Nature Biotechnology*, **20**(8), pp. 821-825.
- Du, Z., Li, H., and Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, **25**, pp. 464-482.
- Gorby, Y. A., Yanina, S., McLean, J. S., Rosso, K. M.,

- Moyles, D., Dohnalkova, A., Beveridge, T. J., Chang, I. S., Kim, B. H., Kim, K. S., Culley, D. E., Reed, S. B., Romine, M. F., Saffarini, D. A., Hill, E. A., Shi, L., Elias, D. A., Kennedy, D. W., Pinchuk, G., Watanabe, K., Ishii, S., Logan, B. E., Nealson, K. H., and Fredrickson, J. K. (2006). Electrically conductive bacterial nano-wires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**(30), pp. 11358-11363.
- Jung, S. H. and Regan, J. M. (2007). Comparison of anode bacterial communities and performance in microbial fuel cells with different electron donors. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **77**(2), pp. 393-402.
- Lee, H. S., Parammeswaran, P., Marcus, A. K., Torres C. I., and Rittmann, B. E. (2008). Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells(MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates. *Water Research*, **42**, pp. 1501-1510.
- Liu, H., Cheng, S., and Logan, B. E. (2005). Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*, **39**(2), pp. 658-662.
- Logan, B. E. (2007). *Microbial Fuel Cells*, WILEY-InterScience.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroeder, U., Keller, J., Frequia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., and Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science and Technology*, **40**(17), pp. 5181-5192.
- Logan, B. E. and Regan, J. M. (2006). Microbial fuel cells-challenges and applications. *Environmental Science and Technology*, **40**(17), pp. 5172-5180.
- Oh, S. E., Min, B., and Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, **38**(18), pp. 4900-4904.
- Reguera, G., Nevin, K. P., Nicoll, J. S., Covealla, S. F., Woodard, T. L., and Lovley, D. R. (2006). Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, **72**(11), pp. 7345-7348.
- Rozendal, R., Hamelers, H. V. M., Rabaey, K., Keller, J., and Buisman, C. J. N. (2008). Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*, **26**(8), pp. 450-459.
- Schroder, U. (2007). Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **9**, pp. 2619-2629.
- Shimoyama, T., Yamazawa, A., Ueno, Y., and Watanabe, K. (2009). Phylogenetic analysis of bacterial communities developed in a cassette-electrode microbial fuel cell. *Microbes and Environments*, **24**(2), pp. 188-192.
- Tender, L. M., Reimers, C. E., Stecher, H. A., Holmes, D. E., Bond, D. R., and Lowy, D. A. (2002). Harnessing microbially generated power on the seafloor. *Nature Biotechnology*, **20**, pp. 821-825.
- Zhi, Y., Liu, H., and Yao, L. (2008). The effect of suspended sludge on electricity generation in microbial fuel cells. *IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, **2**, pp. 2923-2927.