

공기환원전극 미생물연료전지에서 분리막 종류 및 환원전극 특성에 따른 전기발생 및 미생물 군집구조 변화

Electricity Generation and Microbial Community Structure Variation Depending on Separator Types and Cathode Characteristics in Air-cathode MFC

유재철 · 이창열 · 김선아 · 조해인 · 조순자 · 이태호 †
 Jaecheul Yu · Changyeol Lee · Sunah Kim · Haein Cho · Sunja Cho · Taeho Lee †

부산대학교 사회환경시스템공학부
School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

(2009년 12월 17일 접수, 2010년 01월 12일 채택)

ABSTRACT : Air-cathode microbial fuel cell consisted of 4 unit cells were operated under batch condition and electricity generation and microbial community structure variation were investigated, depending on separator types and cathode characteristics: A) PEM(Proton Exchange Membrane)-30% Wet proofing Carbon Cloth(WC), B) AEM(Anion Exchange Membrane-WC, C) CEM(Cation Exchange Membrane)-WC, D) PEM-No Wet proofing Carbon Cloth(NC). Maximum power densities of PEM-WC, AEM-WC and CEM-WC were 510.9, 522.1 and 504.8 mW/m², respectively. But PEM-NC showed relatively lower maximum power density of 218.3 mW/m². And PEM-WC, AEM-WC and CEM-WC showed similar internal resistances(20.0-28.2 Ω). PCR-DGGE, PCA and diversity indices showed that uncultured bacteria which reported in previous MFC studies were detected in suspended growth bacteria and attached growth bacteria would be affected not by separator type but by cathode characteristic. Thus, cathode characteristic can be one of the critical factors for power generation in air-cathode MFC using PEM, AEM, and CEM as separator.

Key words : *Microbial fuel cell, Separator, Air-cathode, Microbial community*

요약 : 분리막의 종류 및 환원전극의 특성에 따른 전기발생량 및 미생물 군집을 비교하기 위하여, 분리막 및 환원전극의 특성이 다른 4개의 단위전지로 구성되어 있는 공기환원전극 미생물연료전지(4 air-cathode microbial fuel cell)를 회분식 운전하였다: A) PEM(Proton Exchange Membrane)-30% Wet proofing Carbon Cloth(WC), B) AEM(Anion Exchange Membrane-WC, C) CEM(Cation Exchange Membrane)-WC, D) PEM-No Wet proofing Carbon Cloth(NC). 분리막의 종류에 상관없이 최대전력밀도는 PEM-WC(510.9 mW/m²), PEM-WC(522.1 mW/m²), PEM-WC(504.8 mW/m²)로 유사하였으나, 환원전극이 달랐던 PEM-NC는 218.3 mW/m²으로 낮게 나왔다. 내부저항은 분리막의 종류에 상관없이 20.8-28.2 Ω으로 유사하게 나타났다. PCR-DGGE, PCA, 종다양성 분석 결과, 부유미생물 군집은 시간이 경과함에 따라 다르게 나타났으며 기존 MFC 연구에서 보고되었던 uncultured bacteria가 관찰되었다. 한편, 부착미생물 군집은 분리막의 종류에 따라 큰 변화를 나타내지 않았지만, 환원전극의 특성에 따라 군집의 변화가 관찰되었다. 따라서, 기존의 이온교환막을 분리막으로 사용하는 공기환원전극 MFC에서는 환원전극의 선택도 중요한 것으로 나타났다.

주제어 : 미생물연료전지, 분리막, 공기환원전극, 미생물군집

1. 서론

미생물연료전지(Microbial Fuel Cell; MFC)는 하폐수내 유기물로부터 전기에너지를 생산할 수 있는 새로운 바이오 에너지 기술로서 많은 관심을 받고 있다. MFC는 산화전극부와 환원전극부로 구성되어 있으며, 두 전극부는 분리막으로 구분되어져 있다. 산화전극부에서는 혐기성 조건의 박테

리아에 의해 유기물이 산화되고, 전자와 양성자가 발생한다. 전자는 외부회로를 통해서 환원전극부로 이동하게 되고, 양성자는 분리막을 통과하여 환원전극부로 이동한다. 그리고 환원전극부로 이동한 전자와 양성자는 전자수용체인 산소의 최종환원반응에 사용된다. 상기의 연속적인 전자의 흐름을 전기에너지로 회수할 수 있다.^{1~3)}

MFC에서 분리막은 산화전극과 환원전극 또는 각 전극부

† Corresponding author : E-mail : leeth55@pusan.ac.kr Tel : 051-510-2465 Fax : 051-514-9574

의 용액을 분리하기 위해서 사용된다. 특히 산화전극부에서 발생하는 양성자(H⁺)만을 선택적으로 전달하기 위하여 양성자이온교환막(Proton Exchange Membrane; PEM)이 널리 이용되고 있다. 하지만, 일반적으로 산화전극부에는 양성자보다 Na⁺, NH₄⁺, Ca₂⁺, Mg₂⁺ 등의 양이온들이 10⁵배 이상 존재하고 있기 때문에 환원전극부로의 양성자 이동을 방해하고, MFC의 전기발생에도 영향을 미칠 수 있다. 최근에는 PEM 대신 비교적 저렴한 양이온교환막(Cation Exchange Membrane; CEM) 또는 음이온교환막(Anion Exchange Membrane; AEM)등의 이온교환막도 널리 사용되고 있다.^{4,5)}

한편 MFC의 환원전극부를 대기중에 노출시켜 대기 중의 산소를 직접 전자수용체로 이용하는 공기환원전극 MFC가 이용되고 있다. 공기환원전극의 경우, 산화전극부로의 산소 확산을 줄이고, 환원전극부에서 산소의 원활한 반응을 위해서 촉매 및 코팅처리하여 사용하고 있으며, 일반적으로 30% 방수처리된 탄소천(Carbon Cloth)이 널리 사용되고 있다.^{6,7)} 하지만, 일반 탄소천에 비해서 가격이 비싸다는 문제점이 있으며, 향후 MFC의 scale-up 경우, 건설비용과 운전 비용을 증가시키는 원인이 될 수 있다.

Kim 등⁸⁾은 AEM을 분리막으로 이용하는 이중반응조 MFC의 전기발생량이 PEM이나 CEM을 분리막으로 이용한 것보다 전기발생량이 높았으며, 내부저항도 작다고 보고하였다. 그리고, Zuo 등⁹⁾은 AEM을 분리막으로 이용하는 공기환원전극 MFC의 전기발생량이 CEM보다 높을 뿐만 아니라 전기발생량도 낮다고 보고하였다. 이와 같이 몇몇 연구를 통해서, 분리막의 종류에 따른 전기발생량은 비교되었으나, 공기환원전극 MFC에서 이러한 환원전극의 특성에 따른 전기발생량에 대해 보고된 바가 없다. 또한, 분리막의 종류나 환원전극의 특성에 따른 미생물 군집에 대한 연구도 수행되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 미생물연료전지에서 널리 사용되고 있는 양성자이온교환막, 양이온교환막, 음이온교환막을 분리막으로 사용하고, 30% 방수처리 탄소천과 방수처리되지 않은 탄소천을 환원전극으로 이용하는 공기환원전극

MFC를 회분식으로 운전하였다. 그리고, 각 조건에 따른 전기발생량을 비교하고, PCR-DGGE를 이용하여 부유 및 부착 미생물 군집을 해석하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 미생물 연료전지 구성 및 운전

본 연구에 사용된 MFC는 Fig. 1처럼 4개의 단위전지로 구성되어 있으며 한 개의 산화전극부(9 L)를 공유하고 있는 4 air-cathode MFC(4A-MFC)이다. 모든 단위전지의 산화전극(108 cm²)은 흑연펠트(graphite felt)로 사용하였으며, 환원전극(108 cm²)은 30% 방수처리된 탄소천(30% wet proofing carbon cloth, E-Tek, USA; WC)과 방수 처리되지 않은 탄소천(No wet proofing carbon cloth, E-Tek, USA; NC)를 이용하였다. 그리고 공기환원전극은 코팅 및 촉매처리하였다.¹⁰⁾ 각 전극은 티타늄을 이용하여 외부에서 연결할 수 있도록 하였다. 각 단위전지의 분리막은 양성자이온교환막(Proton Exchange Membrane; PEM, Nafion 117, Dupont Co., USA), 음이온교환막(Anion Exchange Membrane; AEM, AMI-7001, Membranes International Inc., USA), 양이온교환막(Cation Exchange Membrane; CEM, CMI-7000, Membranes International Inc., USA)를 이용하였으며, 자세한 전지의 구성은 Table 1과 같다.

산화전극부에는 부산시 수영하수처리장의 혐기조 소화 슬러지를 식중하여 회분식운전하였으며, 아세테이트를 기질(전자공여체)로 이용하였다(COD 720 mg/L). 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, CaCl₂ · H₂O 0.1 g/L, CH₃COONa 1 g/L, trace elements 1 mL/L이었으며, 전압발생이 50 mV 이하가 되면 새로운 배지로 교체하였다. 외부저항은 1,000 Ω, 운전온도는 25°C, pH는 7±0.5이었다.

Table 1. Different cell assemblies to investigate effects of separator types and cathode on power generation in 4A-MFC

Conditions	A	B	C	D
Separator types	PEM	AEM	CEM	PEM
Separator thickness(mm)	0.19	0.46	0.46	0.19
Cathode	WC	WC	WC	NC

PEM: proton exchange membrane, AEM: anion exchange membrane, CEM: cation exchange membrane, WC: 30% wet proofing carbon cloth, NC: No wet proofing carbon cloth

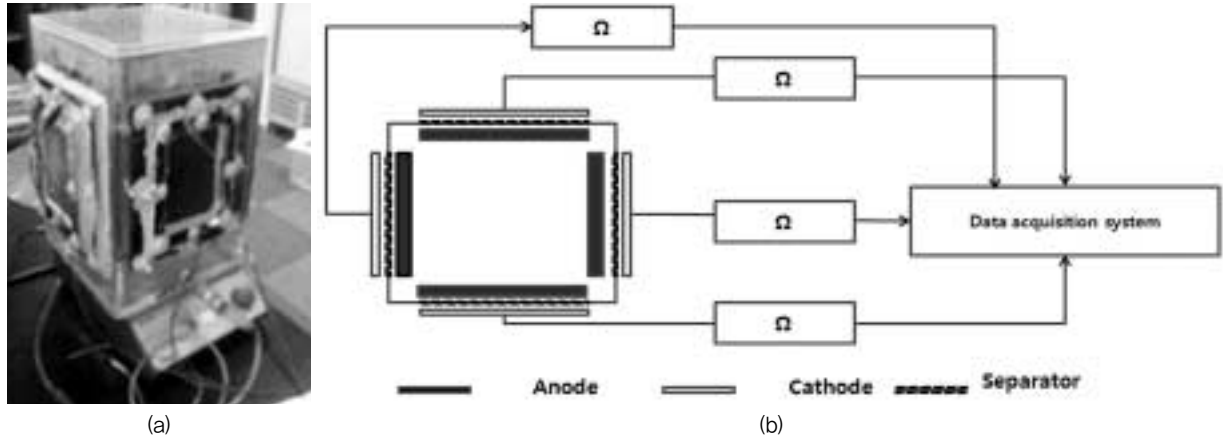


Fig. 1. (a) Photograph and (b) schematic diagram of 4A-MFC used in this study

2.2. 분석방법

MFC에서 발생하는 전압의 변화는 Data acquisition system(Model 7700, Keithley Instruments Inc., USA)을 이용하여 측정하였으며, 3번의 회분식 운전후, potentiostat(KST-P1, Kosentech, Korea)를 이용하여 10 mV/sec 조건에서 전압-전류곡선 및 전력밀도곡선을 구하였다. 산화전극부 유출수의 SCOCr 농도는 AA3(Bran+Luebbe-Auto Analyzer 3, SPX Corporation, Germany)을 이용하여 측정하였다.

전력밀도와 쿨롱효율은 각각 식(1) 및 식(2)을 이용하여 구하였다. 단 본 연구에 사용된 MFC의 특성상 4개의 단위전지가 하나의 산화전극부를 공유하고 있기 때문에, COD 분해과정에서 발생하는 전자는 4개 산화전극부로 동일하게 이동한다고 가정하였다.

$$P = \frac{V \cdot I}{S_{an}} \quad (1)$$

P : 전력밀도(W/m²)

V : 전압(V)

I : 전류(A)

S_{an} : 산화전극 면적(m²)

$$CE = \frac{8 \cdot \int_0^1 Idt}{F \cdot v \cdot \Delta COD} \quad (2)$$

CE : coulombic efficiency(%)

F : Faraday's 상수(96,485 C/mol · 전자수)

v : 반응기 부피(L)

8 : 상수

ΔCOD : COD 제거량(mol/L)/4

I : 전류(A)

2.3. 미생물군집해석

분리막 종류 및 환원전극 특성에 따른 산화전극부의 부유 미생물 및 전극부착 미생물을 해석하기 위하여 배지를 교체할 때마다 시료를 채취하였다. 채취된 시료의 DNA는 PowerSoil™ DNA extraction kit(MoBio Labs, Carlsbad, CA, USA)를 이용하여 추출하였으며, 추출된 DNA는 0.5 mL 튜브에 10 × Taq buffer 2.5 μL, 10mM dNTP 10 μL, 각각의 primer 0.25 μL (10 pmol), DNA template 2 μL, Taq DNA polymerase(Solgent Co., Korea) 0.125 μL을 첨가하고 나머지는 증류수를 첨가하여 총 부피가 50 μL가 되도록 PCR stock solution을 제조하여 PCR을 실시하였다. 각 primer에 따른 PCR 조건은 Table 2와 같다. PCR 산물은 1% agarose gel에 전기영동

Table 2. PCR primer and condition used in this study

Primer	PCR conditions
Eub 8F/1392R	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
Eub 341F/518R	9 min 95°C, followed 30 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
Eub 341F(GC) /518R	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

후 ethidium bromide(0.5 mg/L)로 염색하여 확인하였으며, PCR purification kit(SolGent Co., Korea)를 사용하여 정제하였다.

DGGE를 위해서 30-60%(변성제 농도 100%는 7 M Urea와 40% formamide)의 농도구배가 있는 acrylamide gel을 제조하여 사용하였다. PCR 산물을 겔에 주입한 후 D-code system(model 475 Gradient delivery system, Bio-Rad laboratories, Inc., USA)를 이용해서 20 V에서 15분간, 200 V에서 6시간동안 60℃에서 전기영동을 수행하였다. DGGE band profile은 UV transilluminator (UVitec gel documentation system, Cambridge, UK)를 이용해서 확인하였다. 그리고 Fingerprinting Informatix II(Bio-Rad Co., Hercules, CA, USA)를 이용해서 각 band의 명도를 확인하였으며, SPSS 14.0(SPSS Inc, Chicago, IL, USA)을 이용해서 주성분분석(Principle Components Analysis; PCA)분석을 실시하였다. 그리고, DGGE band의 명도를 이용해서 각 조건별 풍부도와 종다양성 지수를 구하였다. 풍부도는 각 조건별 DGGE band의 숫자로서 표현할 수 있으며, 종다양성 지수에는 Shannon-Weiner 종다양성 지수(H)¹¹⁾와 Simpson 종다양성 지수(D)¹²⁾가 있으며 다음 식(3)과 (4)를 이용해서 구할 수 있다.

$$H = -\sum (pi)(\log_2 pi) \quad (3)$$

$$D = 1 - \sum (pi)^2 \quad (4)$$

H : Shannon-Weiner diversity index

D : Simpson's diversity index

pi : Individual band intensity/total band intensity

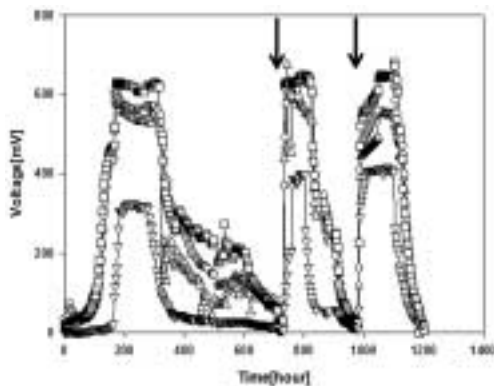


Fig. 2. Voltage(mV) generated from unit cells with different separator types and cathodes in 4A-MFC. The arrows indicated substrate feeding; ○: PEM-WC, □: AEM-WC, △: CEM-WC, and ▽:PEM-NC

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분식 운전기동안 전기발생량

슬러지를 식중하고 약 50시간 경과 후, 모든 단위전지에서 전기가 발생하기 시작하였다. 사용한 분리막의 종류에 상관없이 유사한 전기발생량을 나타냈으나, 방수처리되지 않은 전극을 사용하는 경우에는 전기발생량이 낮은 것을 확인할 수 있다(Fig. 2). 외부저항이 1 kΩ인 회분식 운전기간동안 평균 최대 전압발생량을 살펴보면, PEM-WC의 경우, 약 631.4 mV 였으며, AEM-WC와 CEM-WC는 각각 642.3, 576.3 mV 으로 나타났으며, AEM을 분리막으로 사용하는 경우에 가장 높게 나타났다. 한편에 PEM-NC의 경우에는 387.7 mV으로 PEM-WC에 비해 약 40% 낮게 나타났다. 따라서, 분리막의 종류보다는 환원전극의 특성이 전기발생에 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2. 분리막 종류 및 환원전극 특성에 따른 최대전력 밀도

3번의 회분식 운전 후 potentiostat를 이용하여 10 mV/sec 조건으로 전력밀도곡선과 전압-전류곡선을 구하여, 최대전력밀도, 내부저항, OCV(Open Circuit Voltage)을 알아보고자 하였다. PEM-WC, AEM-WC, CEM-WC의 최대전력밀도는 각각 510.9, 522.2, 504.8 mW/m²으로 AEM 이 다소 높았지만, 큰 차이는 없는 것으로 나타났다(Fig. 3). 하지만, PEM-NC의 경우, 단위전지의 최대전력밀도는 218.3 mW/m²으로 PEM-WC보다 약 50% 낮게 나타났다. Kim 등⁸⁾은 PEM, CEM, AEM를 분리막으로 이용하는 큐브 형태의 이중반응조 미생물연료전지의 최대전력밀도는 각각 514, 480, 610 mW/m²으로 AEM을 분리막으로 이용할 때 높게 나타난다고 보고하였다. 또한 AEM을 분리막으로 이용

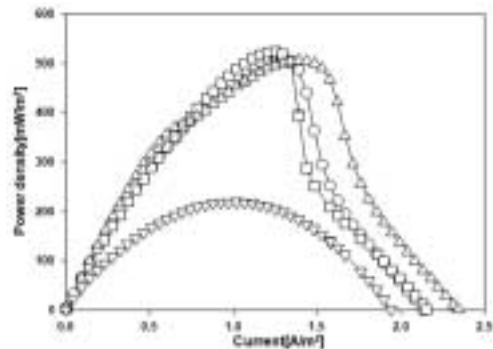


Fig. 3. Power density curve acquired from the unit cells in 4A-MFC; ○: PEM-WC, □: AEM-WC, △: CEM-WC, and ▽:PEM-NC

하는 공기환원전극 MFC의 최대전력밀도는 449 mW/m²으로 CEM을 분리막으로 이용하는 경우(286 mW/m²)에 비해 57% 높았다.⁹⁾

3.3 분리막 종류 및 환원전극 특성에 따른 내부저항과 쿨롱효율

전압-전류곡선은 Fig. 4에 나타내었다. PEM-WC, AEM-WC, CEM-WC의 OCV는 689.1, 709.6, 648.2 mV였으며, PEM-NC의 OCV는 525.2 mV으로 PEM-WC보다 약 20% 낮게 나타났다. 전압-전류곡선에서 기울기는 내부저항을 의미한다. 동일한 조건의 PEM-WC, AEM-WC, CEM-WC의 내부저항은 각각 22.0, 20.0, 28.2 Ω으로 유사하게 값을 보였기 때문에 분리막의 종류는 내부저항에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다. 또한 PEM-NC의 내부저항도 약 21.7 Ω으로 낮게 나타났다. 본 실험에서는 각 전극의 전위를 측정하지 못하였지만, 환원전극 또는 산화전극 전위가 환원전극의 특성에 영향을 받아서 OCV와 최대전력밀도값이 낮게 나타난 것으로 사료된다. Oh 등¹³⁾은 각 전극의 전위를 측정하지 않았지만, 환원전극의 특성(전자수용

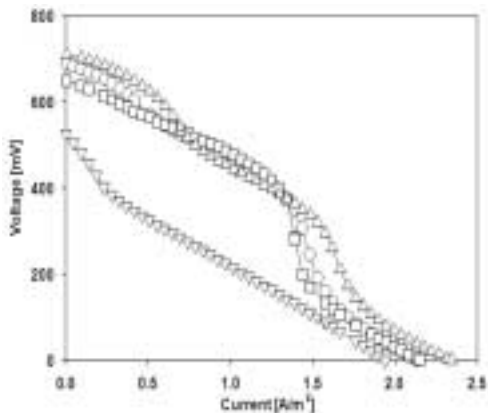


Fig. 4. Voltage-current curve acquired from the unit cells in 4A-MFC; ○: PEM-WC, □: AEM-WC, △: CEM-WC, and ▽: PEM-NC

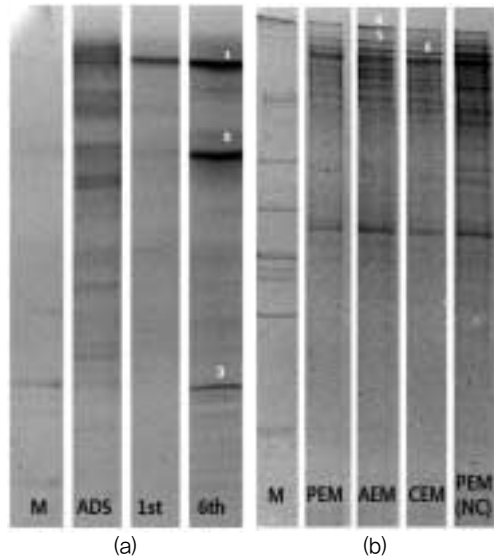


Fig. 5. DGGE band profile based on 16s rDNA; (a) suspended growth bacteria and (b) attached growth bacteria in 4A-MFC

체와 이용되는 촉매)에 따라서 OCV 및 최대전력밀도 값이 다르게 나타난다고 보고하였다. PEM, CEM, AEM를 분리막으로 이용하는 큐브형태의 이중반응조 MFC의 내부저항은 약 84 Ω으로 유사하게 나타났으며,⁸⁾ 공기환원전극 MFC의 경우, AEM의 내부저항은 약 47 Ω으로, CEM(55 Ω)보다 낮게 나타났다.⁹⁾

회분식 운전기간동안 유기물 제거율은 평균 84.5%으로 나타났으며, 이를 바탕으로 각 단위전지의 쿨롱효율을 계산하였다. PEM-WC, AEM-WC, CEM-WC의 쿨롱효율은 각각 44.0, 45.2, 40.4%으로 분리막 종류에 따라 큰 차이가 없었으나, PEM-NC의 쿨롱효율은 28.0%으로 다소 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. Bacterial phylotype richness and diversity for the suspended and attached growth bacterial communities in 4A-MFC

Microbial community	Separator type	Richness		Diversity
		S	H	D
Suspended growth bacteria	ADS	27	4.34	0.94
	1st cycle	19	4.00	0.92
	6th cycle	13	3.28	0.87
Attached growth bacteria	PEM-WC	17	3.68	0.90
	AEM-WC	16	3.80	0.92
	CEM-WC	16	3.80	0.92
	PEM-NC	17	2.50	0.98

ADS; Anaerobic digestion sludge, S; the number of distinct DGGE bands, H; Shannon-weiner diversity index, D; simpson's diversity index

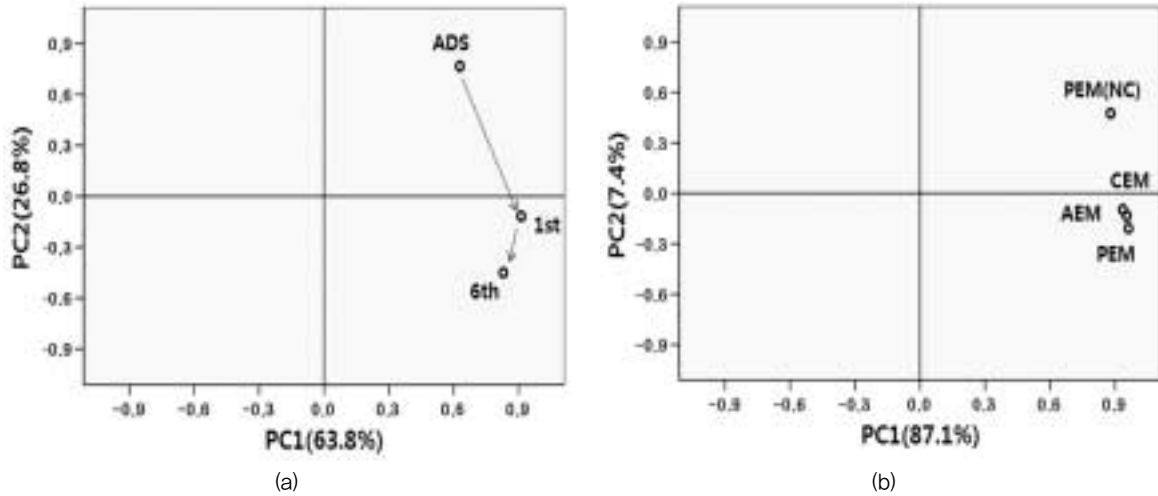


Fig. 6. PCA based on DGGE band intensity and location: (a) suspended growth bacteria and (b) attached growth bacteria in 4A-MFC

3.4 분리막 종류 및 환원전극 특성에 따른 미생물군집 특성

PCR-DGGE 사진은 Fig. 5에 나타내었다. 부유미생물과 부착미생물의 군집구조가 확연히 다른 것을 확인할 수 있었으며, 부유미생물의 경우, 초기 식중 슬러지에서 시간이 변함에 따라 특정 밴드가 짙어지는 것을 확인할 수 있었다.

하지만, 부착미생물의 DGGE band는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 미생물 군집 변화를 자세하게 분석하기 위해서 PCA를 수행하고, 종다양성 지수를 계산하였다. PCA 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 부유미생물의 경우, 회분식 운전이 진행됨에 따라 초기 식중 슬러지의 미생물 군집이 달라지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6a). 반면에 부착미생물의 경우, 분리막의 종류에 따라 군집의 변화는 없었지만, 환원전극 특성에 따라 군집이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6b).

일반적으로 Shannon-Weiner(H)와 Simpson(D) 값이 높을수록 군집내 종 다양성이 높아진다는 의미이며, 본 연구에서는 DGGE 분석결과만으로 종 다양성지수가 계산되었기 때

문에 정확도가 떨어질 우려가 있으나 전체적인 경향 판단은 가능하였다. Shannon-Weiner(H)와 Simpson(D) 종다양성 지수는 Table 3에 나타내었다. 부유미생물의 경우, 회분식 운전이 진행됨에 따라 다양성이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 부착미생물의 경우, 분리막의 종류에 상관없이 종다양성 지수(H: 3.68-3.80, D:0.90-0.92)는 유사하게 나타났다. 하지만, 방수특성이 없는 전극을 사용한 경우에는 종다양성 지수가 다르게 나타났다. 따라서 환원전극의 특성이 산화전극부의 부착미생물 군집에 변화를 준다고 판단하였다. 본 연구에서 각 전극의 전위를 측정하지는 않았지만, 산화전극 표면에 형성되는 군집에 의해서 산화전극의 전위가 결정될 수 있으므로,¹⁴⁾ 군집의 변화가 산화전극전위에 영향을 준 것으로 판단하였다.

DGGE 밴드를 분석한 결과, 대부분의 종들은 uncultured species이었으며, Bacteroidetes, Deltaproteobacteria에 속하는 종들도 있었다. Band 3과 band 4는 Uncultured bacterium clone MFC-GIST445(98%), Uncultured Desulfuromonadales bacterium clone MFC 68H01

Table 4. Sequence analysis of extracted DGGE bands

Band name	Acc. No.	Most similar Sequence	Similarity (%)	Phylum
1	AB513434	Uncultured Bacteroidetes bacterium clone	91	Bacteroidetes
2	GQ152923	Uncultured bacterium clone MEC_Bicarb_Ac-032	98	Environmental samples
3	EU704654	Uncultured bacterium clone MFC-GIST445	98	Environmental samples
4	FJ823851	Uncultured Desulfuromonadales bacterium clone MFC 68H01	100	Deltaproteobacteria
5	FM205942	Uncultured delta proteobacterium	97	Deltaproteobacteria
6	FJ592898	Uncultured bacterium clone C10_SB1A	94	Environmental samples

(100%)와 유사한 종으로서, 기존의 MFC 연구에서 보고되었던 종들이다.^{15,16)} 이를 통해서 장치 내 전기활성박테리아가 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. 자세한 분석결과는 Table 4에 정리하였다.

4. 결론

공기환원전극 MFC에서 각기 다른 분리막(PEM, AEM, CEM)과 환원전극(30% 방수처리탄소전, 방수처리되지 않은 방수전)으로 구성된 단위전지의 전기발생량과 미생물 군집의 특성을 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PEM, CEM, AEM을 각각 이용하는 단위전지의 최대전력밀도는 큰 차이가 없었으나, 환원전극의 방수특성에 따라서 전력밀도가 약 50%정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 분리막의 종류보다는 환원전극의 특성과 같은 다른 요인들이 전기발생량에 영향을 끼치는 것으로 판단된다.
- 2) PCR-DGGE, PCA, 종다양성 분석결과, 분리막의 종류는 미생물 군집 변화에 큰 영향을 끼치지 않았다. 하지만, 환원전극의 특성에 따라 산화전극부 미생물 군집에 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 군집의 변화가 전극전위에 영향을 주었다고 판단된다.
- 3) PEM, CEM, AEM과 같은 이온교환막을 사용하는 공기환원전극 MFC 경우, 분리막의 종류보다 환원전극의 특성이 MFC의 제한인자로 작용하였다. 따라서 MFC 건설 및 운전에서 환원전극의 선택을 중요하게 고려해야 하는 것으로 나타났다.

KSEE

사 사

이 논문은 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역 혁신인력양성사업, 환경부의 폐기물에너지화 특성화대학원사업, 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업(과제번호 070010128)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. 송영채, 우정희, 유규선, “미생물연료전지의 재료: 전극 및

- 분리막, 집전체”, 대한환경공학회지, **31**(9), 693~704(2009).
2. 유재철, 이태호, “환원전극 DO 농도에 따른 단일 및 직렬연결 미생물연료전지 전기발생량 평가”, 대한환경공학회지, **31**(4), 249~255(2009)
3. 이태호, 유재철, 최수정, “생물환원전극을 활용한 미생물연료전지”, 대한환경공학회지, **31**(8), 587~594(2009).
4. Rozendal, R. A., Hamelers, H. V. M. and Buisman, C. J. N., “Effects of membrane cation transport on pH and microbial fuel cell performance”, *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), 5206~5211 (2006).
5. Chae K. J., Choi M., Ajayi F. F., Park W., Chang I. S. and Kim I. S., “Mass transport through a proton exchange membrane (Nafion) in microbial fuel cells”, *Energy Fuels*, **22**, 169~176(2008).
6. Liu H. and Logan B. E., “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**(14), 4040~4046(2004).
7. Shimoyama T., Komukai S., Yamazawa A., Ueno Y., Logan B. E. and Watanabe K., “Electricity generation from model organic wastewater in a cassette-electrode microbial fuel cell”, *Environ. Biotechnol.*, **80**, 325~330(2008)
8. Kim J. R., Cheng S., Oh S. E. and Logan B. E., “Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells”, *Environ. Sci. Technol.*, **41**(3), 1004~1009(2007).
9. Zuo Y., Cheng S. and Logan B. E., “Ion exchange membrane cathodes for scalable microbial fuel cells”, *Environ. Sci. Technol.*, **42**(18), 6967~6972(2008).
10. Cheng S, Liu H, and Logan B. E., “Increased power and coulombic efficiency of single-chamber microbial fuel cells through an improved cathode structure”. *Electrochem. Communi.*, **8**, 489~494(2006).
11. Margalef R., “Information theory in ecology”, *General Systems*, **3**, 36~71(1958).
12. Simpson E. H., “Measurement of diversity”, *Nature*, **163**, 688(1949).
13. Oh S. G., Min B. and Logan B. E., “Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells”, *Environ. Sci. Technol.*, **38**(18), 4900~4904(2004).
14. Logan B. E., “Microbial fuel cells”. Wiley-Interscience(2007).
15. Chae K. J., Choi M., J. W. Lee, K. Y. Lee. and Kim I. S.,

“Effect of different substrates on the performanace, bacterial diversity, and bacterial viability in the microbial fuel cells”
Bioresour. Technol., **100**, 3518~3525(2009).

16. Borole A., Hamilton C., Vishnivetskaya T., Leak D. and

Andras C., “Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms flow-through systems”, *Biochem. Eng. J.*, **48**, 71~80(2009).