

전극간 거리와 크기가 토양미생물연료전지의 성능에 미치는 영향 The Effect of Electrode Spacing and Size on the Performance of Soil Microbial Fuel Cells (SMFC)

임성원 · 이해정 · 정재우 · 안용태*[†]

Seong-Won Im · Hye-Jeong Lee · Jae-Woo Chung · Yong-Tae Ahn*[†]

경남과학기술대학교 환경공학과, 녹색기술연구소 · *경남과학기술대학교 에너지공학과

Department of Environmental Engineering, Green Technology Institute (GTI),

Gyeongnam National University of Science and Technology (GNTECH)

*Department of Energy Engineering, GNTECH

(Received October 31, 2014; Revised November 12, 2014; Accepted November 17, 2014)

Abstract : Soil microbial fuel cells (SMFC) have gained a great attention as an eco-friendly technology that can simultaneously generate electricity and treat organic pollutants from the contaminated soil. We evaluated the effect of electrode spacing and size on the performance of SMFC treating soil contaminated with organic pollutants. Maximum power density decreased with increase in electrode distance or decrease in electrode size, likely due to higher internal resistance. The maximum voltage and power density decreased from 326 mV and 19.5 mW/m² with 4 cm of electrode distance to 222 mV and 5.9 mW/m² with 9 cm of electrode distance. In case of electrode size test, the maximum voltage and power density generated was 291 mV, 0.34 mW/m² when both of anode and cathode area were 64 cm² with 4 cm of electrode distance. The maximum voltage decreased by 19~29% when the anode area decreased to 16 cm² while only 3~12% of voltage decreased with cathode area decrease. The maximum power density decreased by 49~68% with decreasing anode size, and by 29~47% with decreasing cathode size. These results showed that the anode area had more significant effects than the cathode area on the power generation of SMFC which has a high internal resistance due to a coexistence of soil and wastewater in the reactor.

Key Words : Soil Microbial Fuel Cell, Electrode Spacing, Electrode Size, Internal Resistance

요약 : 토양 내에서 유기성 오염물질은 혐기성 미생물에 의해 분해되지만 전자수용체의 부족으로 상당량이 토양에 잔류하게 된다. 토양미생물연료전지(soil microbial fuel cells, SMFC)는 전극을 통해 전자 소비를 증진시켜 유기물 분해를 촉진시키고 동시에 전력도 생산하기 때문에, 다양한 유기성 오염원으로 오염된 토양을 환경 친화적으로 복원시킬 수 있는 기술로서 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 전극간 거리와 전극 크기가 SMFC의 전기적 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 유기물이 풍부한 토양과 인공폐수 혼합물을 이용하여 SMFC를 단일반응조로 구성하였다. SMFC에서 발생된 전력량은 전극간 거리가 멀어지거나 전극 크기가 작아질수록 내부저항이 증가하여 감소하였다. 전극 크기는 64 cm²로 고정하고 전극간 거리는 4~9 cm로 변화를 주었을 때, 전극간 거리가 4 cm 조건에서 최대전압 326 mV, 최대전력밀도 19.5 mW/m²가 얻어졌고 거리가 멀어질수록 전압발생량은 19~32% 감소하고 최대전력밀도는 56~69% 감소하는 것으로 나타났다. 전극 크기 변화 실험에서는 전극간 거리를 4 cm로 고정하고 전극 크기를 16~64 cm²로 변화를 주었다. 두 전극 크기가 64 cm² 조건에서 최대전압 291 mV, 최대전력밀도 0.34 mW/m²로 측정되었으며 산화전극 크기가 작아지면, 최대전압은 19~29% 감소하였고, 환원전극의 경우는 3~12% 감소하였다. 최대전력밀도는 산화전극이 작아지면, 49~68% 감소하였고, 환원전극이 작아지는 경우에는 29~47% 감소하였다. SMFC는 인공폐수와 토양 혼합물질을 반응기 내부물질로 사용하기 때문에, 전자 및 이온전달속도가 느려 환원전극 크기에 비해 산화전극 크기에 더 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

주제어 : 토양미생물연료전지, 전극간 거리, 전극 크기

1. 서론

미생물 연료전지(microbial fuel cell, MFC)는 혐기성미생물의 촉매 작용을 통해 유기물의 화학적 에너지를 전기에너지로 직접 전환하는 기술이다.¹⁻⁴⁾ MFC 반응기로 유입되는 유기물은 산화전극 표면에 생물막(biofilm) 형태로 존재하는 혐기성 미생물에 의해 산화되어 이산화탄소(CO₂)로 전환되며 전자(electron), 양성자(proton)를 생성시킨다. 생성된 전자는 산화전극으로 전달된 후 도선을 따라 환원전극으로 이동하고, 양성자는 용액을 통해 환원전극으로 이동하게 되

고 외부에서 환원전극으로 공급된 산소(O₂)와 반응하여 최종부산물인 물(H₂O)을 생성한다.²⁾

현재 미생물 연료전지는 크게 액체상 미생물연료전지(liquid phase microbial fuel cell)와 고체상 미생물연료전지(solid phase microbial fuel cell)로 분류할 수 있다. 액체상 미생물연료전지는 생활하수, 산업폐수와 같은 하·폐수처리, BOD 측정 센서와 바이오 가스(CH₄, H₂) 생성을 목적으로 사용되고 있으며, 고체상 미생물연료전지는 오염된 토양, 목질섬유소 폐기물, 음식물 쓰레기, 슬러지 등의 처리 목적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.^{2,5)} 혐기성조건에서

[†] Corresponding author E-mail: ytahn@gntech.ac.kr Tel: 055-751-3882 Fax: 055-751-3889

유기물 분해는 고체상 미생물연료전지의 산화전극에서 일어나는 반응으로 토양 복원에 중요한 대사 작용이다. 그러나 자연계에선 적당한 전자 수용체(electron acceptor)의 부재로 인해 반응이 진행되지 않아, 일부 유기성 오염물질은 젖은 토양이나 퇴적물 속에 잔류하게 된다. Fe(III) 산화물(oxides), 질산염(nitrates), 황산염(sulfates), 산소(O₂)와 같은 전자수용체를 오염된 토양에 주입하여 분해 작용을 촉진할 수 있으나 지속적으로 주입하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에 사용하고자 하는 고체상 미생물연료전지는 산화전극에 존재하는 혐기성미생물의 유기물 분해 촉매작용과 생성된 전자를 전극을 통해 쉽게 이동시켜 소모하게 함으로써 안정적이고 빠르게 유기물을 분해할 수 있기 때문에 적용 가능성이 크다.⁶⁾

Mohan 등⁷⁾은 수분을 첨가한 음식물 쓰레기(food waste)를 기질로 하여 전극 거리가 5 cm인 조건에서 최대전력밀도 4 mW/m²를 얻었고, 혐기성소화 과정으로 인해 생성된 지방산의 작용으로 전력발생량이 현저하게 감소한 고체상 미생물연료전지에 완충액(Na₂CO₃)을 사용하여 전력발생량 일부를 회복시킬 수 있음을 밝혔다. Wang 등¹⁰⁾은 왕겨, 콩과 커피 부산물의 혼합비를 다르게 하여 기질의 C/N비를 5:1부터 37.5:1까지 변화를 주어 운전한 결과, C/N비 31:1 조건에서 최대전력밀도 1.2 mW/m²를 얻었다. Huan 등⁴⁾은 반응기 내부에 토층과 물층으로 구성된 토양미생물연료전지(soil microbial fuel cell, SMFC)를 구성하여 토층과 물층의 깊이가 각각 5 cm, 3 cm 조건에서 최대전력밀도 0.72 mW/m²를 얻었으며, 산화전극으로의 산소 침투현상을 억제하기 위해 일정 토층깊이를 유지해야 함을 보였다. Huang 등⁶⁾은 원통형 구조의 SMFC를 적용한 혐기성 분해반응은 SMFC를 사용하지 않은 혐기성 분해반응보다 폐놀을 약 23배 정도 더 많이 분해할 수 있음을 보고하였다.

이러한 고체상 미생물연료전지는 기술의 적용범위가 제한되고 유기물이 적은 토양의 경우에 생산되는 전력(10~20 mW/m²)이 작다는 단점이 있다. 또한 산화전극으로 산소 침투를 막기 위해 토층의 깊이를 깊게 사용하고 이로 인해 고체상 기질내부에서의 느린 전자 전달 속도로 인해 높은 내부저항을 가지는 단점을 가지고 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 본 연구에서는 전극간 거리 및 전극 크기가 SMFC 성능에 미치는 영향을 규명하기 위해서, 전극내부물질로 다량의 유기물을 함유하고 있는 토양과 인공폐수 혼합물을 이용한 토양미생물연료전지를 기조로 하여 전극간 거리 별 성능과 전극 크기 별 성능을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. SMFC 구성 및 운전

본 연구에서는 J시 G대학에 위치한 녹차재배지에서 토양의 표층 1 cm를 제거하고 아랫부분을 채취하여 눈금간격 2 mm 표준체(10 mesh)로 체거름 한 후, 105 °C에서 24시간

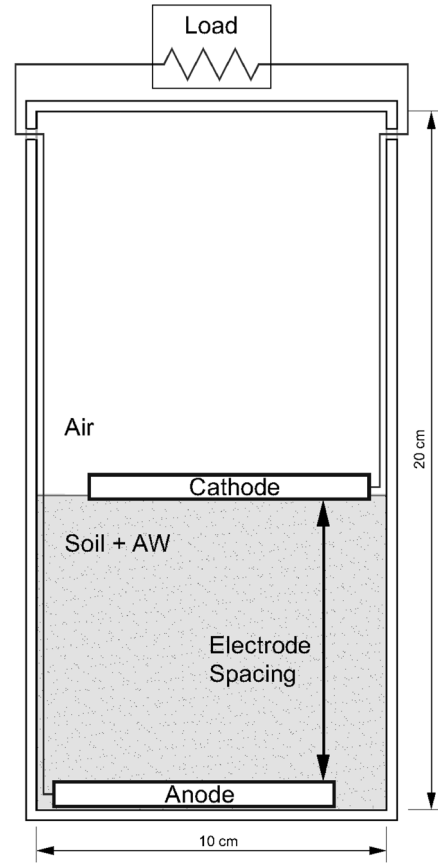


Fig. 1. Schematic diagram of soil microbial fuel cell (SMFC).

동안 건조시킨 토양을 사용하였다. 반응기는 아크릴을 이용하여 정육면체 형태(W100 × L100 × H200 mm)로 제작하였고, 반응기 내부 수분 증발 억제와 전극 고정을 위해서 실리콘으로 기밀처리하였다(Fig. 1). 산화전극과 환원전극은 두께 5 mm의 carbon felt (Morgan Co, UK)로 제작하였고 산화전극은 반응기 제작 전에 T시 축산폐수에 24시간 동안 접촉시킨 후에 사용하였으며 스테인레스 와이어(0.45 mm)를 이용하여 전극과 외부저항을 연결하였다. 인공폐수(artificial wastewater, AW)는 glucose (1.09 g/L)를 기질로 사용하였고, nutrient solution을 포함한 pH 7.3의 인산염 완충액(K₂HPO₄, 5.36 g/L; KH₂PO₄, 2.5 g/L; NH₄Cl, 0.31 g/L; KCl, 0.13 g/L; NaHCO₃, 16.8 g/L; trace minerals and vitamin)을 첨가하여 제조하였다. 오염된 토양을 제조하기 위해서, 전처리를 거친 토양과 인공폐수를 2 g : 1 mL 비율로 혼합하여 실험에 사용하였다.

전극간 거리가 SMFC 성능에 미치는 영향을 평가할 목적으로 SMFC는 토양과 인공폐수의 혼합액 용적(900 mL)과 전극의 크기(W80 × L80 × T5 mm)는 64 cm²로 일정하게 구성하였고, 토양 혼합물의 상부에 위치한 환원전극을 기준으로 산화전극을 전극간 거리가 4, 7, 9 cm가 되도록 위치시켜 실험을 진행하였다. 전극의 크기 변화 실험은 전극간 거리(4 cm)와 토양혼합액의 부피(400 mL)를 고정시키고 환원전극 또는 산화전극 중에 하나의 전극 크기(64 cm², 36

Table 1. Experiment condition for individual soil microbial fuel cells

| | | SMFC-4 cm | SMFC-7 cm | SMFC-9 cm | SMFC-AC64 | SMFC-A36 | SMFC-A16 | SMFC-C36 | SMFC-C16 |
|-----------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Volume (mL) | | 900 | | | | 400 | | | |
| Electrode size (cm ²) | anode size | | 64 | | 64 | 36 | 16 | 64 | 64 |
| | cathode size | | 64 | | 64 | 64 | 64 | 36 | 16 |
| Electrode distances (cm) | | 4 | 7 | 9 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

cm², 16 cm²)를 다르게 하여 실험하였다. Table 1은 위의 두 실험조건을 정리한 표이다. 모든 실험은 회분식으로 외부저항 1,000 Ω을 연결하여 30±1°C 조건에서 수행하였고 digital multimeter (3803 Digital Hitester, JAPAN)를 이용하여 발생 전압을 측정하였다.

2.2. 분석방법

2.2.1. 토양 시료 분석

토양시료의 pH를 측정하기 위해 전처리를 거친 토양 5 g 과 증류수 25 mL를 50 mL 원심관에 넣고 충분히 혼합과정을 거치고 1시간 정치시킨 후, 상등액의 pH를 pH meter (Sevencompact S220, Mettler Toledo, SWITZERLAND)를 이용하여 측정하였다. 토양의 C, H, N, S 함량은 원소분석기(Flash 2000 Series, Thermo Fisher Scientific, USA)를 이용하여 분석하였으며 유기물함량(organic matter content, OMC)은 작열 감량법(loss-on-ignition method, LOI)을 이용하여 측정하였다. 105°C 조건에서 24시간 건조시킨 입경크기가 2 mm 이하인 토양(W₁)을 전기로에 넣어 550°C로 2시간 동안 작열 시킨 후, 실온에서 냉각시켜 토양 무게(W₂)를 측정하고 다음의 식 (1)을 통해 강열감량(LOI)을 계산하였고, 유기물함량(OMC)은 앞에서 구한 LOI와 식 (2)를 이용하여 구하였다.¹¹⁾

$$LOI(\%) = \frac{W_1(g) - W_2(g)}{W_1(g)} \times 100 \quad (1)$$

$$OMC(\%) = [(0.458 \times LOI) - 0.4] \times 1.724 \quad (2)$$

2.2.2. 전기적 계산

SMFC의 전기적 성능은 각 반응기에 연결된 외부저항에서 측정된 전압(V)을 이용하여 옴의 법칙을 이용하여 계산되었다.

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

$$P = I \times V \quad (4)$$

여기서, R은 반응기에 연결된 외부저항 값이고, V는 연결된 외부저항(R)에서 측정된 전압이다. I와 P는 각각 전류와 발생전력을 나타낸다. 측정된 전류 및 전력은 산화전극의 면

적 또는 반응기의 용적에 대한 정규화된 값(normalized value)으로 나타내었다. SMFC의 분극특성을 관찰하기 위해 외부저항을 10,000 Ω부터 15 Ω까지 순차적으로 낮추면서 저항양단의 전압을 측정하였다. 외부저항을 변화시킬 때는 30분간 안정화 시간을 거친 후에 발생전압을 측정하였으며 열린회로전압(open circuit voltage, OCV)은 외부저항을 분리시켜 약 2시간동안 안정화시킨 후에 발생전압을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 사용된 토양의 화학적 특성

실험에 사용된 토양의 기본적인 화학적 특성은 Table 2와 같다. 토양의 pH는 6.8로 중성에 가까운 토양으로 나타났고 토양의 원소 성분은 C (2.5%), H (0.6%), N (0.2%)의 순으로 함유된 것으로 나타났다. 토양과 AW를 혼합한 토양은 AW가 함유하고 있는 유기물과 buffer solution의 영향으로 순수 토양보다 조금 높은 pH 7.2로 측정되었다. 토양 전처리의 효과로 C (4.7%)는 1.9배, H (8.8%)는 1.3배, N (0.3%)은 1.7배 증가하였고 OMC는 12.3%로 1.2배 증가하였다. 두 토양의 pH가 중성영역에 가까우므로 미생물의 성장에 적합하며 토양 종류에 따라 OMC는 다양하지만 일반적인 토양은 10% 함유하고 있으므로 작열 감량법을 이용한 순수 토양의 OMC가 9.9%인 것으로 보아 일반적인 토양으로 판단된다.⁴⁾

Table 2. The quantity and composition of organic matter in soil

| | pH | Elements composition (%) | | | | LOI ^{a)} (%) | OMC ^{b)} (%) |
|-----------|-----|--------------------------|------|------|---|--------------------------|--------------------------|
| | | C | H | N | S | | |
| Soil | 6.8 | 2.53 | 0.63 | 0.20 | 0 | 13.5 | 9.9 |
| Soil + AW | 7.2 | 4.72 | 8.83 | 0.34 | 0 | 16.4 | 12.3 |

^{a)}LOI : Loss-on-ignition, ^{b)}OMC : organic matter content

3.2. 전극간 거리의 영향

전극간 거리의 변화에 따른 SMFC의 전압발생량은 거리가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 전극간 거리가 4 cm (SMFC-4 cm)인 조건에서 326 mV의 최대전압이 발생하였고, 7 cm (SMFC-7 cm) 조건에서 19% (262 mV), 9 cm (SMFC-9 cm) 조건에서 32% (222 mV)가 감소하였다. 기존의 SMFC 및 일실형 액상미생물연료전지의 연구 결과에

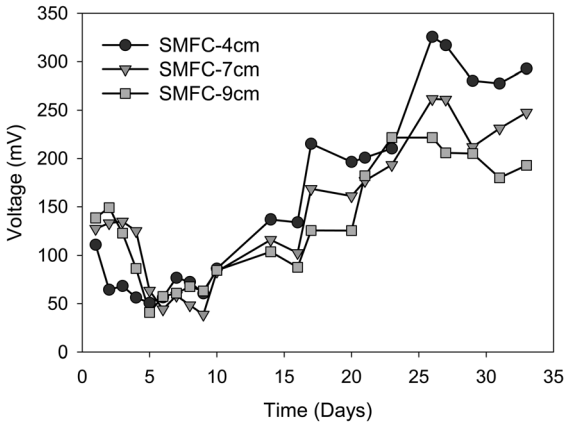


Fig. 2. Voltage generation in the SMFCs with an electrode spacing of 4 cm, 7 cm, 9 cm.

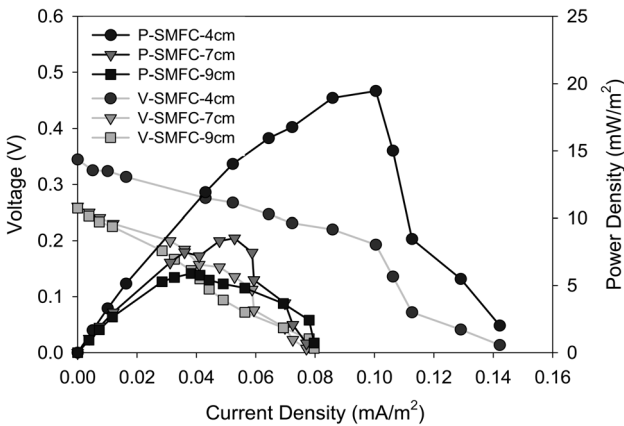


Fig. 3. Performance of SMFCs with respect to voltage and power density obtained with electrode spacing between anode and cathode.

따르면, 전극간 거리가 감소할수록 산화전극과 환원전극의 분극 저항(polarization resistance) 감소로 인해 내부저항이 작아져 발생전압이 높아지는 경향을 보이지만 일정거리 이하에서는 산소침투(oxygen intrusion)로 인해 발생전압이 오히려 낮아지는 결과를 나타내었다.^{4,14)} 산화전극으로의 산소침투가 MFC에 미치는 영향은 일시적으로 노출되었을 때는 미생물 군집구조에는 영향이 적고 미생물 활성도에 영향을 미쳐 발생전압을 감소시키며, 장기적으로 노출되었을 때는 미생물 군집구조까지 변화시킨다.¹⁵⁾ Sediment 미생물 연료전지에서도 전극간 거리가 멀어질수록 내부저항 및 과전압(overpotential)은 증가하는 결과를 보였지만, sediment의 깊이가 깊어질수록(전극간 거리가 멀어질수록) sediment 내부에 존재하는 전자 수용체(O_2 , NO_3^- , NO_2^- , metal oxides, SO_4^{2-} , CO_2)의 양이 많아져 일반적인 미생물연료전지에서 일어나는 반응 경로와 다른 미생물학적 반응으로 인해 산화전극의 산화 환원 전위(redox potential)가 감소하여 발생전압이 증가하였다.¹⁶⁾ 위의 결과로 미루어 보아 SMFC 성능은 토양의 유기물 함량이 sediment보다 적어 산화전극의 활성도의 영향보다 전극간 거리의 영향을 더 받으며, 토층

의 깊이가 4 cm 이상에는 산소 침투의 영향이 적을 것이라 판단되므로 전극간 거리가 멀수록 발생 전압이 감소하는 현상은 내부저항의 변화에 의한 것으로 판단된다. 또한, 분극곡선(polarization curve)을 통해 측정된 최대전력밀도 크기도 발생전압의 크기와 동일한 결과를 보였다(Fig. 3). 전극거리가 4 cm인 조건에서 19.5 mW/m^2 의 최대전력밀도가 측정되었고, 7 cm와 9 cm로 거리가 증가할수록 최대전력밀도는 56% (8.5 mW/m^2)와 69% (5.9 mW/m^2)가 감소하는 경향을 보였으며 전극간의 거리가 멀어질수록 최대전력밀도가 감소하는 기존의 연구 결과와 유사하게 나타났다.⁵⁾

3.3. 전극 크기의 영향

산화 또는 환원전극 크기가 작아질수록 SMFC 성능이 감소하는 경향이 보였다(Fig. 4). 산화·환원전극 크기가 64 cm^2 (SMFC-AC64)인 조건에서는 최대전압 291 mV가 발생하였고, 산화전극 크기가 36 cm^2 (SMFC-A36)와 16 cm^2 (SMFC-A16)일 때는 전압발생량이 19% (234 mV), 29% (206 mV) 감소하였다. 환원전극의 크기가 36 cm^2 (SMFC-C36)와 16 cm^2 (SMFC-C16)로 작아지면, 전압발생량이 3% (284 mV), 12% (255 mV) 감소하였다. 최대전력밀도는 SMFC-

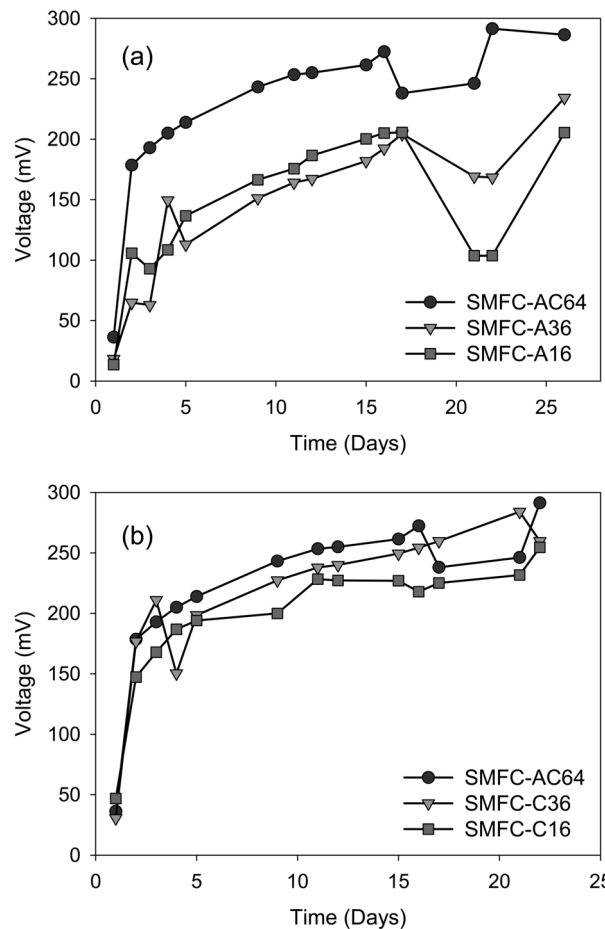


Fig. 4. Voltage generation for SMFCs with different electrode size, (a) anode electrode size, (b) cathode electrode size.

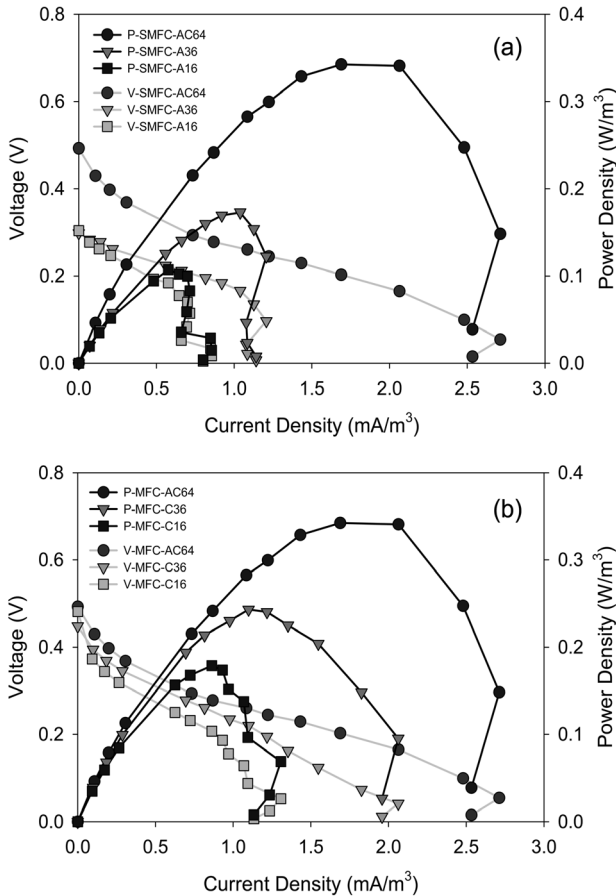


Fig. 5. Performance of SMFCs with respect to voltage and power density obtained with different electrode size, (a) anode electrode size, (b) cathode electrode size.

AC64에서 0.34 mW/m^3 으로 가장 높게 발생하였고, 산화전극 크기를 줄인 반응기 SMFC-A36와 SMFC-A16에서는 최대전력밀도가 49% (0.17 mW/m^3), 68% (0.11 mW/m^3) 감소하였으며, 환원전극 크기를 줄인 반응기 SMFC-C36와 SMFC-C16에서는 최대전력밀도가 29% (0.24 mW/m^3), 47% (0.18 mW/m^3) 감소하였다. 전극 크기가 감소할수록 분극곡선의 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5). 이러한 분극곡선(polarization curve) 기울기를 통해 연료전지의 전압손실을 평가하는데 사용되는 내부저항(internal resistance)을 알 수 있다.³⁾ 그러므로 발생전압 및 최대전력밀도의 감소는 이러한 내부저항 증가로 인해 발생하는 것이라 판단된다. 산화전극과 환원전극 크기변화 실험결과를 비교했을 때, 산화전극 크기를 줄인 SMFC-A36, A16의 분극곡선 기울기가 환원전극 크기를 줄인 SMFC-C36, C16 분극곡선의 기울기보다 더 급격하게 증가하므로(Fig. 5), 산화전극의 크기변화는 상대적으로 환원전극의 크기변화보다 더 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이 결과는 MFC 반응기의 경우, 느린 산소 환원반응속도로 인해 환원전극의 성능이 MFC가 전력을 생산하는데 있어 제한요소라는 기존의 연구결과와 차이를 보이는 것으로 나타났다.^{13,17-19)} 분리막이 존재하지 않는 MFC에서 환원전극의 polarization resistance은 산화전극

의 polarization resistance 보다 40배 높고 환원전극에서 측정된 ohm resistance도 산화전극에서 측정된 것보다 2배 더 높게 측정되었다.¹⁷⁾ 또한, 산화전극 크기가 2~3배 증가했을 때, 발생전력이 28~40% 증가하였으므로 산화전극 크기보다 다른 인자의 영향이 큰 것으로 나타났다.¹⁹⁾ 분리막이 존재하는 MFC에서는 분리막 크기가 작을 경우 산화전극 크기가 전력발생에 미치는 영향이 환원전극 크기보다 적었지만, 분리막 크기가 클 경우에는 산화전극의 크기가 환원전극의 크기보다 전력발생량에 더 많은 영향을 끼치는 것으로 나타났다.¹⁸⁾ 본 연구의 결과와 기존의 MFC 연구 결과들이 다른 경향을 보이는 이유는 MFC는 액체상 물질을 반응기 내부 물질로 사용하고 있지만 SMFC는 인공폐수와 토양 혼합물질을 반응기 내부물질로 사용하기 때문에 전자 및 이온전달속도가 상대적으로 느리기 때문인 것으로 볼 수 있다.⁸⁾ 그러므로 산소 공급과 밀접한 관계가 있는 환원전극 크기보다 전자 및 이온 공급에 영향을 주는 산화전극 크기의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

4. 결론

토양 및 인공폐수 혼합물을 이용한 고체상 미생물연료전지의 전력 발생에 미치는 전극간 거리와 전극 크기의 영향에 관해 연구하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전극간 거리가 멀어질수록 SMFC 성능이 떨어지는 경향을 나타내었다. 전극간 거리가 4 cm에서 최대전압 326 mV와 최대전력밀도 19.5 mW/m^2 를 얻었고, 전극 거리를 7 cm과 9 cm로 증가시키면 전압발생량은 19~32% 감소하였으며 최대전력밀도는 56~69% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 전극간 거리가 멀어질수록 반응기의 내부저항이 증가하므로 전압손실을 유도하는 것으로 나타났고, 토양 속 낮은 유기물함량으로 인해 전극간의 거리가 산화전극의 활성화도보다 더 중요한 인자이며, 반응기 내부의 토층 깊이가 4 cm 이상에서는 산소가 산화전극으로 침투하는 현상이 효과적으로 억제되기 때문이다.

2) SMFC는 전극 크기가 작아질수록 성능이 저하되는 경향을 보였다. 산화, 환원전극 크기가 64 cm^2 조건에서 최대전압 291 mV를 얻을 수 있었고, 산화전극 크기가 작아지면 최대전압이 19~29% 감소하였고, 환원전극 크기가 작아지면 3~12% 감소하였다. 최대전력밀도는 산화, 환원전극 크기가 64 cm^2 일 때 0.34 mW/m^3 로 발생하였고, 산화전극 크기가 작아지면 최대전력밀도가 49~68% 감소하였고, 환원전극 크기가 작아지면 29~47% 감소하였다. 인공폐수와 토양 혼합물질을 반응기 내부물질로 사용하는 SMFC는 전자 및 이온전달속도가 느려 환원전극 크기보다 산화전극 크기에 더 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

오염된 토양 복원목적으로 SMFC를 구성할 때, 전극간 거리는 산소 침투의 영향을 적게 받고 최고의 전력발생밀도

가 측정된 4 cm가 적합할 것으로 판단되며, SMFC 성능은 환원전극 크기보다 산화전극 크기에 영향을 더 많이 받기 때문에, 유기물 분해 속도를 올리기 위해서 충분한 크기의 산화전극을 사용하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

KSEE

References

- Logan, E. L., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. and Ravaey, K., "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), 5181~5192(2006).
- Han, S.-K., "Microbial fuel Cells: Principles and applications to Environmental health," *J. Environ. Health Sci.*, **38**(2), 83~94(2012).
- Kazuya, W., "Recent development in microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy," *J. Biosci. Bioeng.*, **106**(6), 528~536(2008).
- Deng, H., Wu, Y.-C., Zhang, F., Huang, Z.-C., Zhen, Z., Xu, H.-J. and Zhao, F., "Factors affecting the performance of single-chamber soil microbial fuel cells for power generation," *Pedosphere*, **24**(3), 330~338(2014).
- Chae, K.-J., Choi, M.-J., Kim, K.-Y., Ajayi, F. F., Chang, I.-S. and Kim, I. S., "Selective inhibition of methanogens for the improvement of biohydrogen production in microbial electrolysis cells," *Int. J. Hydro. Energy*, **35**(24), 13379~13386(2010).
- Huang, D.-Y., Zhou, S.-G., Chen, Q., Zhao, B., Yuan, Y. and Zhuang, L., "Enhanced anaerobic degradation of organic pollutants in a soil microbial fuel cell," *Chem. Eng. J.*, **172**(2-3), 647~653(2011).
- Venkata Mohan, S. and Chandrasekhar, K., "Solid phase microbial fuel cell (SMFC) for harnessing bioelectricity from composite food waste fermentation: influence of electrode assembly and buffering capacity," *Bioresour. Technol.*, **102**(14), 7077~7085(2011).
- Huan, D., Chen, Z. and Zhao, F., "Energy from plants and microorganisms: progress in plant-microbial fuel cells," *ChemSusChem*, **5**(6), 1006~1011(2012).
- Rezaei, F., Richard, T. L., Brennam, R. A. and Logan, E. L., "Substrate-Enhanced Microbial Fuel Cells for Improved Remote Power Generation from Sediment-Based Systems," *Environ. Sci. Technol.*, **41**(11), 4053~4058(2007).
- Wang, C.-T., Liao, F.-T. and Liu, K.-S., "Electrical analysis of compost solid phase microbial fuel cell," *Int. J. Hydro. Energy*, **38**(25), 11124~11130(2013).
- Oliver, H., Andre, F. L. and Gerry, L., "Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results," *J. Paleolimnol.*, **25**(1), 101~110(2001).
- Song, T.-S., Wang, D.-B., Han, S., Wu, X.-Y. and Zhou, C. C., "Influence of biomass addition on electricity harvesting from solid phase microbial fuel cells," *Int. J. Hydro. Energy*, **39**(2), 1056~1062(2014).
- Ahn, Y., Zhang, F. and Logan, E. L., "Air humidity and water pressure effects on the performance of air-cathode microbial fuel cell cathodes," *J. Power Sources*, **247**, 655~659(2014).
- Cheng, S., Liu, H. and Logan, E. L., "Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(7), 2426~2432(2006).
- Futamata, H., Bretschger, O., Cheung, A., Kan, J., Owen, R. and Neelson, K. H., "Adaptation of soil microbes during establishment of microbial fuel cell consortium fed with lactate," *J. Biosci. Bioeng.*, **115**(1), 58~63(2013).
- An, J., Kim, B., Nam, J., Ng, H. Y. and Chang, I. S., "Comparison in performance of sediment microbial fuel cells according to depth of embedded anode," *Bioresour. Technol.*, **127**, 138~142(2013).
- He, Z., Huang, Y., Manohar, A. K. and Mansfeld, F., "Effect of electrolyte pH on the rate of the anodic and cathodic reactions in an air-cathode microbial fuel cell," *Bioelectrochem.*, **74**(1), 78~82(2008).
- Oh, S.-E. and Logan, E. L., "Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells," *Appl. Microbiol. Biot.*, **70**(2), 162~169(2006).
- Gangrekar, M. M. and Shinde, V. B., "Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production," *Bioresour. Technol.*, **98**(15), 2879~2885(2007).