



연속류식 미생물연료전지의 유기물 제거 및 전기 발생 특성

김정구, 정연구[†], 박송인*

금오공과대학교 토목환경공학부, 전남대학교 환경공학과*
(2010년 2월 4일 접수, 2010년 3월 24일 수정, 2010년 3월 27일 채택)

Characteristics of Organic Material Removal and Electricity Generation in Continuously Operated Microbial Fuel Cell

Jeong-gu Kim, Yeon-Koo Jeong[†], Song-In Park*

Department of Civil and Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

Department of Environmental Engineering, Chonnam National University*

ABSTRACT

Two types of microbial fuel cells(MFC) were continuously operated using synthetic wastewater. One was conventional two-chambered MFC using proton exchange membrane(PEM-MFC), the other was upflow type membraneless MFC(ML-MFC). Graphite felt was used as a anode in PEM-MFC. In membraneless MFC, two MFCs were operated using porous RVC(reticulated vitreous carbon) as a anode. Graphite felt was used as a cathode in all experiments.

In experiment of PEM-MFC, the COD removal rate based on the surface area of anode was about $3.0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ regardless of organic loading rate. And the coulombic efficiency amounted to 22.4~23.4%. The acetic acid used as a fuel was transferred through PEM from the anodic chamber to cathodic chamber.

The COD removal rate in ML-MFC were $9.3\sim 10.1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$, which indicated the characteristics of anode had no significant effects on COD removal. Coulombic efficiency were 3.6~3.7 % in both cases of ML-MFC experiments, which were relatively small. It was also observed that the microbial growth in cathodic chamber had an adverse effects on the electricity generation in membraneless MFC.

Keywords : Microbial Fuel cell, Reticulated Vitreous Carbon, COD removal, Coulombic efficiency, Polarization curve

[†]Corresponding author : Jeongyk@kumoh.ac.kr

초록

양성자 교환막 미생물연료전지(PEM-MFC)의 경우 양극의 표면적을 기준으로 유기물 제거능력을 산출하면 유기물 부하에 관계없이 3.0 g COD/m² · d 수준으로 나타났다. 또 안정적인 전압이 관찰된 시기의 쿨롱 효율은 22.4~23.4 %로 높지 않은 수준이었다. 양성자 교환막은 양성자뿐만 아니라 초산도 통과시키는 것으로 확인되었다.

양성자 교환막을 사용하지 않은 상향류식 미생물연료전지(ML-MFC)의 경우 다공성 RVC 전극을 사용한 관계로 전극의 외부면적당 유기물 제거능력은 9.3~10.1 g COD/m² · d로 나타났다. 이는 양성자 교환막을 사용한 경우에 비하여 3배 정도 높은 수준이다. 그러나 RVC 양극의 비표면적 차이에 따른 유기물 제거 능력 차이는 크지 않았다.

ML-MFC의 경우 전기 발생이 안정적이지 못하였으며, 쿨롱 효율도 3.6~3.7 %로 매우 낮은 수준이었다. 전기 발생량이 안정적이지 못한 것은 음극에 성장한 미생물의 영향으로 판단된다. 이를 해결하기 위해 음극부의 공기주입량을 증가시키면 일시적으로 전기 발생이 증가하였으나 오래 지속되지 못하였다.

핵심용어 : 미생물연료전지, RVC, COD 제거, 쿨롱효율, 분극곡선

1. 서론

미생물연료전지(MFC, Microbial Fuel Cell)는 미생물이 유기물 또는 무기물을 산화시킬 때 발생하는 전자를 전극에 전달하여 전기를 발생시키는 장치이다¹⁾. 기질이 산화되면서 발생하는 전자는 양극에 전달되어 도선을 따라 음극으로 흐르게 된다. 음극에 전달된 전자는 환원반응에 이용되어 소모된다. 일반적으로 산소를 전자수용체로 사용하는 경우 양극부에서 음극부로 전달된 양성자(수소이온)와 반응하여 물이 생성된다.

미생물연료전지의 초기 연구는 미생물로부터 양극으로의 전자 전달체계 및 관련 물질, 관련 미생물의 종류 및 생리적 특성, 효율적인 전자수용체의 종류, 반응기의 물리적 구성, 전극물질의 개선을 통한 효율 향상 등으로 이루어졌다^{1~4)}. 이러한 연구를 통해 미생물연료전지의 성능 및 효율이 급속하게 개선되고 있으며, 가스 상태의 산소를 직접 전자수용체로 사용하여 별도의 음극부를 구성하지 않는 one-chambered MFC까지 개발되었다^{1~4)}. 최근에는 축산폐수⁵⁾, 질산염의 환원⁶⁾, 아조염료⁷⁾, 니트로벤젠⁸⁾, 황화물⁹⁾ 등 환경오염물질 처리와 미생물연료전지 기술을 연계하는 연구가 진행되었다. 이와 같이 최근에는 단순한 전원공급장치로서의

미생물연료전지 성능 개선뿐만 아니라 오염물질 처리와 연계한 에너지 생산분야로 적용이 활발한 실정이다.

본 연구는 연속식으로 폐수를 처리하는 미생물연료전지의 장기적인 유기물 제거 및 전기발생 특성을 조사하여 실용화에 필요한 정보를 확보하는데 목적이 있다. 이에 따라 전통적인 방식의 양성자 교환막(PEM, Proton Exchange Membrane)을 사용하여 양극부와 음극부를 분리한 미생물연료전지와 양성자 교환막이 없이 실제 폐수처리시설과 유사한 형태인 상향류식 연속류 미생물연료전지(ML-MFC, Membraneless Microbial Fuel Cell)를 운전하였다. 유기물 부하 등 운전조건이 미생물연료전지의 유기물 제거 및 전기 발생에 미치는 영향을 장기 운전을 통해 조사하였다. 또한 폐수처리 효율을 충분히 확보하면서 전기 발생량을 증가시키기 위한 방안으로 다공성 탄소 전극(RVC, Reticulated Vitreous Carbon)을 양극으로 사용하여 그 적용성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험 장치 및 조건

2.1.1 양성자 교환막 미생물연료전지 (PEM-MFC)

1) 반응기

[Fig. 1(A)]와 같이 양극부와 음극부를 양성자 교환막으로 분리한 초기 형태의 미생물연료전지(Two-chambered MFC)를 사용하였다¹⁾. 양성자 교환막(Nafion 117, Dupont Co.)은 12 cm²(3×4 cm) 크기로 반응조 중앙에 위치하도록 하였다. 반응기는 아크릴로 제작하여 각 반응부의 실용적은 312 mL (5×5×12.5cm)가 되도록 하였다. 전극은 양극(anode)과 음극(cathode) 모두 graphite felt (5×5×1cm)로 표면적 70 cm²가 되도록 하였다.

폐수는 정량펌프로 양극부 하부에 연속적으로 주입하여 상부로 월류되도록 하였으며, 음극에 충분한 양의 산소를 공급하기 위하여 공기를 주입하였다. 음극부에는 수돗물을 양극부와 동일한 부피로 첨가하였다. 실험이 진행됨에 따라 증발, 시료채취 등으로 손실되는 음극부 용액은 매일 보충하여 양극부와 음극부의 수두차가 발생하지 않도록 하였다.

2) 운전조건

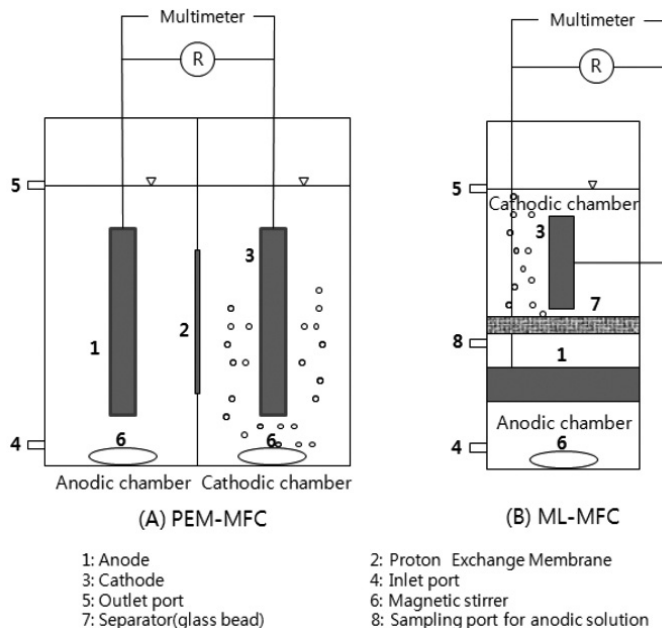
합성폐수의 조성은 Owens et al. (1976)과 같이 제조하였으며¹⁰⁾, 초산을 유기물로 사용하였다. 폐수는 인산염으로 pH 7.0이 유지되도록 하였으며, NaHCO₃를 첨가하여 충분한 알칼리도가 확보되도록 하였다. 식중 미생물은 G시 하수처리시설 소화조에서 채취한 것을 사용하였으며, 초기 농도가 약 2,000 mg/L가 되도록 양극부에 주입하였다.

유입수 COD는 1단계에서는 초산으로 약 370 mg/L로 하였으나 44일부터 750 mg/L로 2배 증가시켰다. HRT는 3.6일 정도로 일정하게 유지하였다. 실험 초기에 회분식으로 합성폐수를 주입하여 안정화시킨 후 약 1주일 후부터 연속 운전하였다.

2.1.2 막이 없는 미생물연료전지(ML-MFC)

1) 반응기

[Fig. 1 (B)]와 같은 구조의 양성자 교환막이 없는 미생물연료전지(ML-MFC)를 사용하였으며¹¹⁾, 두 개의

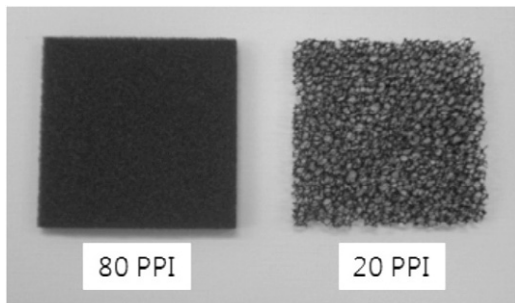


[Fig. 1] Schematic diagram of PEM-MFC and ML-MFC reactor used.

미생물연료전지를 동시에 운전하였다. 각 반응조의 하부는 혐기성 상태가 유지되는 양극부이고, 상부는 산소를 공급하는 음극부로 되어 있다. 양극부와 음극부의 부피는 각각 250 mL (5×5×10cm), 312.5 mL (5×5×12.5cm)이다. 폐수는 아래쪽의 양극부로 유입되어 위쪽의 음극부로 유출되도록 하였다.

양극은 두 반응조 모두 [Fig. 2]와 같은 RVC (Reticulated vitreous carbon, Duocel, ERG Inc.)를 사용하였으며, ML-MFC 1에는 공극의 크기가 큰 것(20 ppi, pores in linear inch)를, ML-MFC 2에는 공극의 크기가 다소 작은 것(80 ppi)를 사용하였다. 따라서 ML-MFC 1의 양극(20 ppi)은 개별 공극의 크기는 크지만 단위 부피당 표면적은 11.5 cm²/cm³ 정도 이고, ML-MFC 2의 양극은 작은 공극의 수가 많아 비표면적은 54.1 cm²/cm³ 정도로 더 크다¹²⁾. 양극은 두께 0.5 cm의 RVC (5×5cm) 4장을 겹쳐 총 부피는 50 cm³이 되도록 하였으며, 하부로부터 5 cm 위에 수평으로 설치하였다. 음극은 두 반응기 모두 graphite felt (5×5×1 cm)를 사용하였으며, 연직 방향으로 설치하였다.

양극부와 음극부는 입경 1mm 유리구슬을 구멍이 뚫린 아크릴 판 위에 두께 1cm로 포설하여 분리하였으며, 양극과 음극의 거리는 5cm가 되도록 하였다. 양극부의 유기물 제거 특성을 조사하기 위해 양극부 용액을 채취할 수 있도록 하였다.



[Fig. 2] RVC(Reticulated vitreous carbon) used in ML-MFC experiments (PPI = Pores per linear inch).

2) 운전조건

합성폐수는 포도당으로 COD 500 mg/L가 되도록 하였으며, 영양물질 및 미량원소 조성은 Owens et al. (1976)과 같게 하였다¹⁰⁾. 식중슬러지는 PEM-MFC 실험과 동일한 것을 사용하였으며, 초기 SS농도를 1,800 mg/L로 하였다. 두 반응기의 HRT(양극부 기준)는 2일로 운전하다 약 16일부터 1일로 단축시켰다. 또한 환원전극부의 공기량은 유량계를 설치하여 0.2~0.7 L/min 범위에서 주입하였다. 또 각 반응조는 자석교반기로 충분히 교반되도록 하였다.

2.2 분석항목 및 방법

유기물 제거 특성은 COD(closed reflux method)로 조사하였다¹³⁾. 발생하는 전압은 컴퓨터와 연결된 Multimeter (Agilent Co., 34410A)로 측정하였으며, 외부저항은 모든 실험에서 500 Ω으로 하였다. PEM-MFC에서는 1시간 간격으로 전압을 측정하였으며, ML-MFC에서는 전압은 2개의 미생물연료전지를 12시간씩 교대로 multimeter와 연결하여 30분 간격으로 측정하였다. 전류 밀도는(current density) 산출된 전류값을 양극의 표면적으로 나누어 계산하였다.

쿨롱 효율(Coulombic efficiency)은 실제로 발생한 전류 값이 제거된 유기물로부터 발생할 수 있는 총 전류에 대한 백분율로 표시된다. 연속식 미생물연료전지의 경우 정상상태에서의 운전결과를 바탕으로 다음 식으로 계산할 수 있다¹⁾.

여기서 F는 Faraday's constant(96,485 C/mol e⁻), b는 산소 당량 계산시 사용되는 전자의 수(4), M은 산소의 분자량, I는 전류(ampere)를 나타내고, q는 시료의 유입 유량(L/sec), ΔCOD는 유입 및 유출수의 COD 농도 차이(g/L)이다.

$$\text{쿨롱 효율}(\%) = \frac{MI}{F \cdot b \cdot q \cdot \Delta COD} \times 100$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 양성자 교환막 미생물연료전지(PEM-MFC)

3.1.1 유기물 제거 특성

COD로 조사한 유기물 제거 특성은 [Fig. 3]과 같다. 유출수 농도는 운전 시작 후 약 25일 경과 시점부터 안정되어 약 56.9 mg/L를 보였으며, 약 82.1 %의 제거효율을 보였다. 44일 경과 시점부터 COD를 약 750 mg/L로 2배 증가시킨 결과 유출수 COD는 약 60일부터 약 500 mg/L 정도로 안정되었다. 이 기간 동안 COD 제거효율은 약 31.1 %로 나타났다. 단계별 유기물 제거량을 양극의 표면적을 기준으로 산출하면 각각 2.96 g COD/m² · d와 2.97 g COD/m² · d이다. 따라서 실험에서 사용한 미생물연료전지에서 제거되는 유기물의 양은 유기물 부하와 관계없는 것으로 나타났으며, 유기물 제거능력은 1단계 운전부터 최대치를 보인 것으로 판단된다.

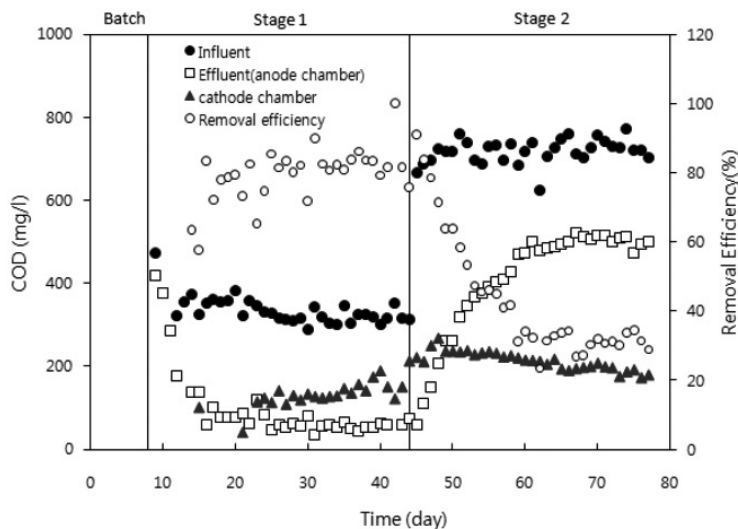
한편 음극부에서도 미생물이 성장하는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 유기물이 존재하기 때문으로 판단되었다. 이에 따라 음극부 용액의 유기물 농도를 측정하였으며, 그 결과는 [Fig. 3]에 제시된 바와 같다. 정상상태에서 음극부 용액의 평균 COD는 1, 2단계에서 각각

137.7 mg/L, 191.2 mg/L로 나타났다. 2단계에서 더 높은 농도를 보이는데, 이는 유입수 COD 농도가 높아졌기 때문으로 판단된다. 1단계의 경우 음극부 용액의 COD는 유출수 수질보다 높았으나 2단계에서는 유출수 수질보다 낮게 유지되었다. Chae et al. (2008)은 양극부의 초산 농도를 67 mg/L로 유지하여 71시간 동안 운전한 결과 Nafion 막을 통해 초산이 음극부로 이동되었다고 보고한 바 있다¹⁴⁾. 이와 같은 현상이 본 실험에서도 발생한 것으로 판단된다.

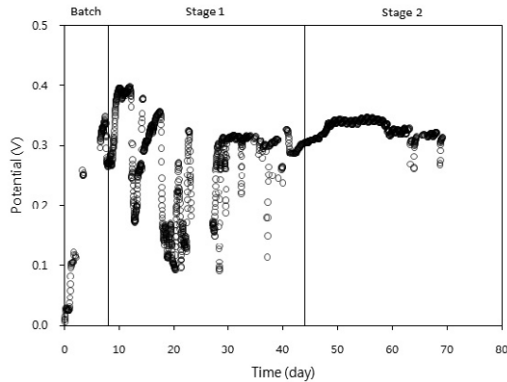
3.1.2 전기 발생 특성

발생된 전기를 전압으로 표시하면 [Fig. 4]와 같다. 초기 회분식으로 운전된 약 7일 동안 전압이 점차 증가하였으며, 미생물연료전지로서 기능을 발휘한다고 판단하여 이후 연속식으로 운전하였다. 연속식으로 운전된 1단계인 약 9일부터 3일간 최대 390 mV의 전압이 관찰되었다. 이후 유입수의 pH를 조정하는 등 일부 실험조건을 변경한 결과 전압이 크게 변동하였으며, 약 29일부터 전압은 300 mV 내외로 안정되었다. 유기물 농도를 증가시킨 2단계 운전에서는 320~330 mV 범위에서 안정적인 전압이 관찰되었다.

안정적인 전압이 관찰된 기간에 대해 쿨롱 효율을



[Fig. 3] COD removal in PEM-MFC (Stage 1: influent COD 370 mg/l, Stage 2: influent COD 750 mg/L).



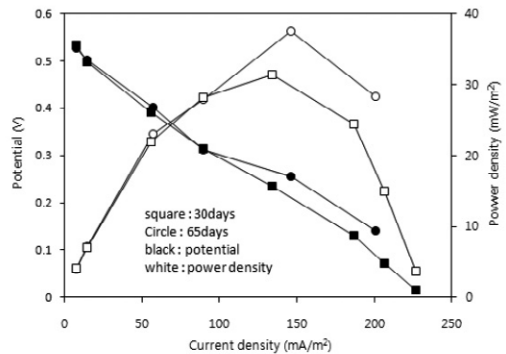
[Fig. 4] Potential observed at external resistance of 500 Ω in PEM-MFC (Stage 1: influent COD 370 mg/l, Stage 2: influent COD 750mg/L).

계산하면 1, 2단계에서 각각 22.4 %, 23.4 %로 나타났다. 미생물연료전지의 전극의 표면적이 일정하기 때문에 유기물 부하에 따른 쿨롱 효율은 큰 차이가 없었다. 또 음극부 용액에 유기물이 다량으로 존재하기 때문에 음극에 미생물이 부착되어 성장하는 것이 관찰되었다. 음극에 미생물이 성장함에도 불구하고 전기는 비교적 안정적으로 발생되었다.

3.1.3 분극곡선

분극곡선은 1, 2단계에서 전압이 안정된 30일과 65일부터 1~2일 동안 연속운전을 유지하면서 작성하였다. 저항을 10~10,000 Ω 범위에서 조정하면서 3시간 동안 5분 간격으로 전압을 측정하였다. 분극곡선은 [Fig. 5]와 같으며, 최대 전력밀도(power density)는 1, 2단계 모두 250 Ω일 때 발생하였다. 이러한 결과는 저항 250 Ω으로 운전할 때 가장 높은 전력을 얻을 수 있음을 의미한다. 최대 전력밀도는 1, 2단계 각각 31.4, 37.8 mW/m²로 나타나 2단계에서 다소 높았다.

전류밀도와 전압 그래프의 기울기는 양성자 또는 도선을 통한 전자의 이동 저항을 의미하며, 이를 옴 손실(Ohmic loss)이라 한다⁴⁾. 직선의 기울기가 완만할수록 저항이 작음을 의미한다. 65일 경에 측정된 전류밀도, 전압 그래프의 기울기가 다소 완만한 것은 상대적으로 옴 손실이 작음을 의미한다. 이는 [Fig. 3]에 나타난 바



[Fig. 5] Polarization curve measured in PEM-MFC.

와 같이 음극부 용액의 유기물을 포함한 전해질 농도가 높아졌기 때문으로 판단된다.

3.2 막이 없는 미생물연료전지(ML-MFC)

3.2.1 유기물 제거 특성

양극의 공극의 크기가 미생물연료전지의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험으로 유기물 제거 특성은 [Fig. 6]과 같다. 실험 초기 1단계에는 HRT 2일(유기물 부하 0.21 kg COD/m³ · d)로 운전하다 약 16일 경과시점부터 2단계로 HRT 1일(유기물 부하 0.44~0.47 kg COD/m³ · d)로 운전하였다.

전체적인 유기물 제거효율은 미생물연료전지에 관계없이 HRT 1일로 운전한 2 단계에서 약 92~93 %의 제거효율을 보여 HRT 2일로 운전한 1단계의 약 84 %보다 더 양호하였다. 또 HRT가 상대적으로 짧은 2단계의 유출수가 두 경우 모두 더 우수한 것은 시스템이 안정화됨에 따른 결과로 판단된다.

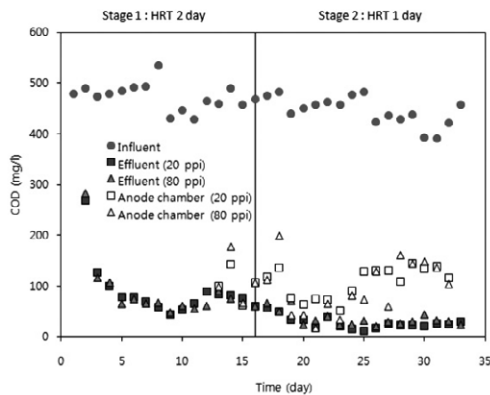
한편 양극부와 음극부의 유기물 제거 특성을 조사하기 위해 양극부의 COD를 측정하였으나 [Fig. 6]과 같이 변동이 다소 크게 나타났다. HRT 1일로 운전된 2단계의 양극부 유기물 제거효율은 ML-MFC 1, ML-MFC 2에서 각각 75.9 %, 77.9 %로 유사하게 나타났다. 따라서 양극에 사용한 RVC의 비표면적 차이가 COD 제거에 미치는 영향은 거의 없다고 판단되었다.

또 제거된 유기물 중에서 나머지 부분은 모두 음극부에서 이루어진 것으로 음극부의 유기물 제거도 활발함을 알 수 있다.

또 양극의 표면적당(육면체의 외부 면적) 유기물 제거효율을 계산하면 ML-MFC 1과 ML-MFC 2에서 각각 9.3 g COD/m² · d, 10.1 g COD/m² · d로 나타났다. 이는 더 긴 HRT로 운전되고, 쉽게 분해될 수 있는 초산을 기질로 사용한 PEM-MFC보다 약 3배 높은 값으로 다공성 전극을 양극으로 사용하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

3.2.2 전기 발생 특성

양성자 교환막이 없는 미생물연료전지에서 전기발생은 다음 [Fig. 7]과 같으며, 전반적으로 변동이 컸다. ML-MFC 1에서는 최대 185 mV(0.37 mA)의 전기가 발생하였고, ML-MFC 2는 최대 125mV(0.25 mA)의 전기가 발생하였다. 최대 전압 관찰 시점에서의 쿨롱 효율은 ML-MFC 1과 ML-MFC 2에서 각각 3.6 %, 3.7 %로 매우 낮은 수준이었다. 이러한 결과는 ML-MFC가 양성자 교환막을 사용하지 않는 형태의 미생물 연료전지이기 때문으로 판단된다. ML-MFC 2의 경우 ML-MFC 1에 비하여 양극의 비표면적이 크에도 불구하고 실제로 발생한 전압은 다소 낮은 값을 보이고 있



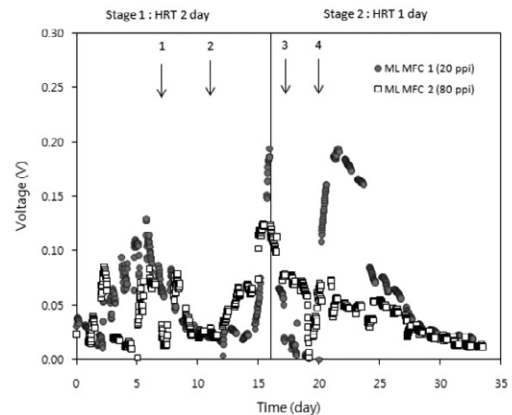
[Fig. 6] COD removal in ML-MFC (ML-MFC 1: 20 ppi, ML-MFC 2: 80 ppi).

다. 한편 He et al. (2005)는 PEM을 사용하여 연속류식 미생물연료전지를 운전한 결과 8.1 %의 쿨롱 효율을 얻은 바 있다¹⁵⁾. 이는 PEM으로 양극부와 음극부가 분리되어 있어 양극부 유출수가 음극부로 이동하지 않았기 때문으로 판단된다.

전술한 바와 같이 음극부로 유출되는 다량의 유기물로 인해 음극에 부착된 미생물의 증식이 관찰되었으며, 전기 발생도 감소하였다. 이에 따라 공기주입량 변화가 전기 발생에 미치는 영향을 조사하였다. 공기주입량을 증가시키면 산소의 포화농도 증가, 전단력에 의한 음극 부착미생물의 탈리 등의 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

공기주입량은 7일부터 이전의 0.2 L/min에서 0.5 L/min로 증가시켰다가 17일부터 다시 0.2 L/min으로 조정하였다. 20일 이후 다시 공기량을 0.2 L/min에서 0.7 L/min으로 증가시켰다.

공기주입량 변화는 대체로 일시적으로 전기 발생량 증가를 가져왔으나 오래 지속되지 않았다. 예를 들어 20일 이후의 경우 전기발생은 ML-MFC 1에서 약 3 일 동안 150 mV 이상의 높은 값을 보였으며, ML-



[Fig. 7] Potential measured in ML-MFC experiment (1: Air flow rate was increased from 0.2 L/min to 0.5 L/min on day 7, 2: Mixing intensity of anodic chamber was decreased on day 11, 3: Air flow rate was decreased from 0.5 L/min to 0.2 L/min on day 17, 4: Air flow rate was decreased from 0.2 L/min to 0.7 L/min on day 20).

MFC 2는 5일 동안 50 mV를 유지하였다. 공기주입량을 증가시켰을 때 일시적으로 전기 발생량이 높아진 것은 음극에 부착된 미생물을 탈리됨에 따라 나타난 결과로 판단된다. 11일이 경과한 시점부터 양극부의 자석교반기 회전속도를 기존의 절반 수준으로 감소시킨 결과 일시적으로 오히려 전기발생량이 증가하였는데, 이는 양극부의 과도한 교반으로 인해 산소가 음극부에서 양극부로 전달되었기 때문으로 판단된다.

Moon et al. (2005)은 양성자 교환막이 없는 미생물 연료전지 실험에서 호기성 미생물은 음극보다 산소 친화도가 커 음극의 환원반응을 저해할 수 있다고 보고한 바 있다⁶⁾. 또한 음극부의 산소 주입량을 증가시켜 일시적으로 전기 발생을 향상시킬 수 있으나 궁극적인 대안이 되지 못하였다. 따라서 양성자 교환막을 사용하지 않는 연속류식 미생물연료전지의 경우 음극에 부착되는 미생물을 억제할 수 있는 별도의 방안을 강구해야 할 것으로 판단되었다.

4. 결론

1. 양성자 교환막 미생물연료전지 (PEM-MFC)의 경우 양극의 표면적을 기준으로 유기물 제거능력을 산출하면 유기물 부하에 관계없이 3.0 g COD/m² · d 수준으로 나타났다. 또 안정적인 전압이 관찰된 시기의 쿨롱 효율은 유기물 부하에 관계없이 22.4~23.4 %로 높지 않은 수준이었다.
2. 양성자 교환막의 경우 양성자 뿐만 아니라 유기물인 초산도 통과시키는 것으로 확인되었다. 이는 음극부의 유기물 농도를 측정할 결과로부터 확인되었으며, 음극부의 미생물 성장의 주된 요인으로 판단되었다.
3. 양성자 교환막을 사용하지 않은 상향류식 미생물 연료전지의 경우 다공성 RVC 전극을 사용한 관계로 전극의 외부면적당 유기물 제거능력은 9.3~10.1 g COD/m² · d로 나타났다. 이는 양성자 교환막을 사용한 경우에 비하여 3배 정도 높은 수준이다. 그러나 RVC 양극의 비표면적 차이에 따른 유기물 제거 능력 차이는 크지 않았다.

4. 양성자 교환막을 사용하지 않은 미생물연료전지의 경우 전기 발생이 안정적이지 못하였으며, 쿨롱 효율도 3.6~3.7 %로 매우 낮은 수준이었다. 이처럼 전기 발생량이 안정적이지 못한 것은 음극에 성장한 미생물의 영향으로 판단된다. 이를 해소하기 위해 음극부의 공기주입량을 증가시키면 전기 발생이 일시적으로 증가하였으나 오래 지속되지 못하였다.

사사

본 연구는 2007년도 금오공과대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Logan, B.E., 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), pp. 5181~5192 (2006).
2. Kim, I.S., Chae, K.J. and Choi, M.J., Verstraete, W., "Microbial fuel cells, Recent advances, bacterial communities and application beyond electricity generation", Environmental Engineering Research, 13(2), pp. 51~65 (2008).
3. Du, Z., Li, H. and Gu, T., "A state of the art review on microbial fuel cells, a promising technology for wastewater treatment and bioenergy", Biotechnology advances, 25, pp. 464~482 (2007).
4. Rismani-Yazdi, H., Carver, S.M., Christy, A.D. and Tuovinen, O.H., "Cathodic limitation in microbial fuel cells, an overview", J. of power sources, 180, pp. 683~694 (2008).
5. Min, B., Kim, J.R., Oh, S.E., Regan, J.M. and Logan, B.E., "Electricity generation from animal

- wastewater using microbial fuel cells”, *Water Research*, 39(20), pp. 4961~4968 (2005).
6. Clauwaert, P., Rabaey, K., Aelterman, P., Schampelaire, L.D., Pham, T.H., Boeckx, P., Boon, N. and Verstraete, W., “Biological denitrification in microbial fuel cells”, *Environ. Sci. & Technol.*, 41, pp. 3354~3360 (2007).
 7. Mu, Y., Rabaey, K., Rozendal, R.A., Yuan, Z. and Keller, J., “Decolorization of Azo dyes in bioelectrochemical systems”, *Environ. Sci. & Technol.*, 43, pp. 5137~5143 (2009).
 8. Mu, Y., Rozendal, R.A., Rabaey, K. and Keller, J., “Nitrobenzene removal in bioelectrochemical systems”, *Environ. Sci. & Technol.*, 43, pp. 8690~8695 (2009).
 9. Rabaey, K., Von De Sompel, K., Maignien, L., Boon, N., Aelterman, P., Clauwaert, P., Schampelaire, L., Pham, H.T., Vermeulen, J., Verhaege, M., Lens, P. and Verstraete, W., “Microbial fuel cells for sulfide removal”, *Environ. Sci. & Technol.*, 40, pp. 5218~5224 (2006).
 10. Owens, W.D., Stuckey, J., Healy, T. and McCarty, P., “Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity”, *Water Research*, 3, pp. 485~492 (1979).
 11. Jang, J.K., Pham, T.H., Chang, I.S., Kang, K.H., Moon, H., Cho, K.S. and Kim, B.H., “Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell”, *Process Biochemistry*, 39, pp. 1007~1012 (2004).
 12. Friedrich, J.M., Ponce-de-Leon, C., Reade, G.W. and Walsh, F.C., “Reticulated vitreous carbon as an electrode material”, *J. of Electroanalytical Chemistry*, 561, pp. 203~217 (2004).
 13. American Public Health Association, “Standard methods for the examination of water and wastewater”, 21th ed. Washington, DC. (2005).
 14. 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 and Fuels*, 22(1), pp. 169~176 (2008).
 15. He, Z., Minteer, S.D. and Angenent, L.T., “Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell”, *Environ. Sci. & Technol.*, 39, pp. 5262~5267 (2005).
 16. Moon, H., Chang, I.S., Jang, J.K. and Kim, B.H., “Residence time distribution in microbial fuel cell and its influence on COD removal with electricity generation”, *Biochemical Engineering Journal*, 27, pp. 59~65 (2005). 