

휘발성지방산으로부터 미생물연료전지에 의한 전기 생산

오상은* · 김수정 · 양재의 · 정영상

강원대학교 자원생물환경학과
(2007년 6월 15일 접수, 2007년 6월 26일 수리)

Electricity Generation from Volatile Fatty Acids (VFAs) Using a Microbial Fuel Cell

S.-E. Oh*, S.-J. Kim, J.E. Yang, and Y.-S. Jung (Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

ABSTRACT: A new technology that utilizes a microbial fuel cell (MFC) has been developed to generate electricity directly from the oxidation of organic matters such as carbohydrates or complex organics in wastewater. Fermentation of these organic matters results in production of volatile fatty acids (VFAs), alcohols, CO₂ and H₂. We investigated the electricity-producing potential of the VFAs and actual food processing wastewater using a two-chambered MFC. The electrons produced by acetate degradation were proportional to acetate concentration in the medium. Acetate concentration and generated power were linearly correlated at a low range of acetate concentration (< 8 mg/L), but at above 8 mg/L of acetate the power produced was maintained at 0.1 mW. When butyrate was added to the anode acclimated to acetate, there was a lag period of 30 hr for electricity generation. However, when propionate was added to the same anode bottle, lag periods were not existed. The wastewater from baby food processing generated the maximum power density of 81±7 mW/m² of electricity and exhibited the Coulombic efficiencies of 27.1% and 40.5% based on TCOD and SCOD, respectively. Sugars in the food processing wastewater were reduced within 50 h from 230 mg/L to < 30 mg/L.

Key Words: Microbial fuel cell, Volatile fatty acids, Electricity generation, Wastewater treatment

서 론

국내 젓소, 소, 말, 돼지로부터 150,484톤/일의 축산폐수가 발생하고 있고 다양한 종류의 식품가공 폐수들이 발생하고 있다¹⁾. 이들 폐수들은 높은 농도의 유기물을 함유하고 있으며, 폐수를 적절히 관리하지 않을 경우 하천의 심각한 오염을 일으킬 우려가 있다. 이들 폐수들은 대부분 혐기성 소화, 활성슬러지법 또는 접촉산화제법에 의하여 처리되고 있는 실정이나 폐수 중에 함유되어 있는 고농도의 유기물들은 적절한 방법에 의해 유용한 에너지원으로 전환이 가능하다²⁻⁴⁾.

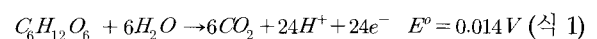
바이오에너지는 바이오매스를 연소하거나 또는 물리, 화학적, 생물학적 처리 공정에 의해 전환되어 발생할 수 있다. 유기성 물질로부터 생산되는 바이오 에너지로는 메탄, 수소

가스, 바이오디젤, 알코올류 등이 있으며 이 외에 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell: MFC)를 이용한 전기 생산에 관한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 MFC는 PEM(proton exchange membrane)에 의해 나누어진 산화전극(anode)과 환원전극(cathode) 반응조로 이뤄져 있고, 각 반응조 내에 산화전극과 환원전극이 있다. 전지의 산화전극에 부착된 미생물은 공급된 유기물을 분해하여 전자와 수소이온으로 변환시키며, 생성된 수소이온은 PEM을 통해 환원전극(cathode)으로 이동하고 생성된 전자는 외부 서킷을 통해 환원전극(cathode)으로 이동한다. PEM을 통해 이동된 수소 이온과 cathode에서 공급되는 산소 분자와 전자가 만나 물이 되어 산화 환원 반응이 완결된다(식 1,2,3). 이때 전자의 흐름이 전류로서 전기에너지의 회수이론이다⁵⁻⁷⁾.

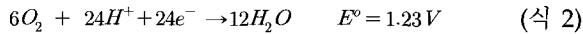
*연락처:

Tel: +82-33-250-6449 Fax: +82-33-241-6640
E-mail: ohsangeun@kangwon.ac.kr

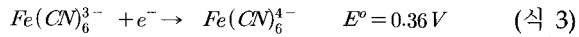
Anode:



Cathode:



Cathode:



유기물(탄수화물, 단백질, 지방)이 가수분해 되거나 발효(fermentation) 되면 휘발성 지방산(Volatile fatty acids: VFAs), 알콜류, 수소가스 및 이산화탄소가 발생한다. 수소발생에 대한 연구는 최근 많은 연구가 진행되고 있지만⁸⁻¹⁰⁾ 생물학적 수소생산(dark fermentation) 후 발생하는 VFAs 등이 발효 부산물로 남는다. 이는 유입되는 BOD의 80~90%를 차지하며 메탄생성균(methane forming bacteria) 또는 홍색 비유황 세균(purple non-sulfur bacteria)과 같은 광합성 미생물을 이용하여 메탄(methanogenesis) 또는 수소(photo-fermentation)로 변환되어야 한다^{11,12)}. 본 연구에서는 부산물로 발생하는 VFAs를 처리하기 위하여 기존에 사용된 메탄생성과 광합성 발효 공정 대신 미생물연료전지를 이용하여 VFAs 중 acetate, butyrate, propionate와 식품가공폐수로부터 전기의 생성 가능성 여부를 평가하고자 하였다.

실험 장치 및 방법

전자공여체와 미생물 배지

본 연구에서 미생물연료전지에 의해 전기를 발생시키기 위해 사용된 유기물로는 acetate(sodium acetate), propionic acid, butyrate(sodium butyrate)와 식품가공 폐수이었다. 식품가공폐수는 이유식 가공 공장에서 채취되었고 채취 후 냉장고(4°C)에 보관하였다. 시료의 성장 실험은 시료채취 후 현장에서 직접 하거나 또는 실험실에서 시료채취 후 일주일 이내에 실시되었다. 폐수 희석 시는 다음의 구성을 가진 medium을 만들어 사용하였다. 증류수를 이용하여 $NaHCO_3$ (3.13 g/L), NH_4Cl (0.31 g/L), $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ (0.75 g/L), KCl (0.13 g/L), Na_2HPO_4 (4.22 g/L), Na_2HPO_4 (2.75 g/L)과 metal 용액(12.5 mL), vitamin 용액(12.5 mL)가 함유되도록 조제하고 NaOH 또는 HCl를 이용하여 pH 7로 만들었다¹³⁾. 실험은 30°C 항온실에서 실시되었다.

MFC 제작 및 운전

미생물 연료전지는 2개의 미디어병(310 mL capacity, Corning Inc. NY)에 유리로 튜브를 만들고 Fig. 1과 같이 합체하여 구성하였으며 종류의 유리 튜브 끝에 고무 gasket(3.5 또는 6.2 cm² cross section)을 각각 넣고 그 중간에 PEM(NafionTM 117, Dupont Co., Delaware)을 삽입하여 클램프 하였다. PEM의 전처리에는 H₂O₂(30%)에 넣어 1시간 동안 끓이고 증류수, 0.5 M H₂SO₄, 증류수 순으로 각각 1시간 끓여 전처리하였으며 보관은 증류수에 넣어 상온에서 보관하였다.

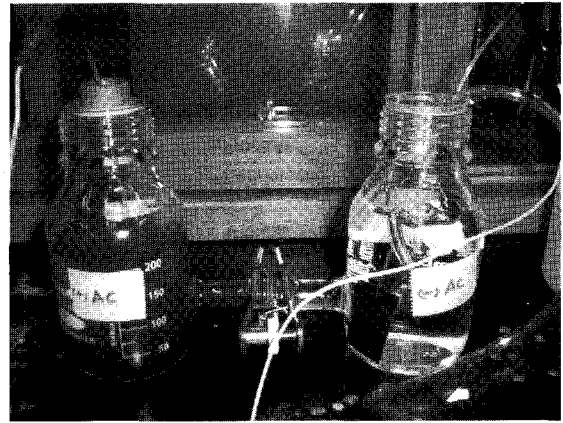


Fig. 1. The two-chambered microbial fuel cell used in this study.

산화전극(anode)으로는 carbon paper(without wet proofing; 2.5 cm × 4.5 cm)를 사용하였으며 환원전극(cathode)으로는 carbon paper의 한 면이 Pt로 코팅된 것(0.5 mg/cm²; 10% Pt; De Nora North America, Inc.)을 사용하였다. 전극은 구리선으로 연결하고 튜빙(Chemfluor[®] FEP Tubing; inner diameter: 0.8 mm)을 구리선에 씌우고 carbon paper와 구리선이 부착되는 부분에 epoxy(Dexter Corp. NJ, USA)를 이용하여 구리선이 산화반응조(anode chamber) 안에서 산화 되지 못하도록 코팅했다. 구리선과 전극이 제대로 연결되었는지 multimeter를 이용하여 확인하였다. 각 전극은 실험 전 증류수에 하루 동안 담가 두었다가 사용하였으며 구리선과 연결된 산화전극(anode)은 반응조에 맞는 setum에 구멍을 뚫어 전극의 튜빙을 통과 시켜 산화전극 반응조가 혐기성조건이 될 수 있도록 제작하였다.

미생물연료전지의 운전은 다음과 같았다. 산화전극 반응조(anode chamber)에 일정 농도의 전자공여체(electron donor)를 유기물이 없는 미생물배지에 넣고 질소가스로 10분가량 퍼지하면서, 하수종말처리장의 혐기성소화조로부터 가져온 0.5 g의 미생물을 넣어 산화전극이 삽입된 septum을 미디어병에 끼우고 뚜껑을 닫았다. 환원전극 미디어병에는 같은 미생물 배지를 250 mL 넣고 환원전극을 넣었고, 외부 서킷으로 산화전극과 환원전극 사이에 저항을 연결하여 그 저항 사이의 생성 볼티지를 볼티미터(2700, Keithley)를 이용하여 30분 간격으로 연속으로 측정하였으며 데이터는 컴퓨터 파일에 저장되도록 하였다.

분석

생성된 파워는 $P=IV$ 로 계산하였으며 여기에서 P(mW)는 파워이며 I(A)는 전류, V(V)는 볼티지이다. 파워밀도(power density)는 계산된 파워에서 MFC의 산화전극(anode)의 표면적으로 나누어 주어 계산하였다. Coulombic 효율(CE)은 다음 식에 의하여 계산되었다.

$$CE = \frac{C_{Ex}}{C_{Th}} \times 100 \quad (식 4)$$

여기서 CE는 Coulombic efficiency(%), C_{Ex} 는 측정된 볼티지로부터 계산된 Coulomb이며, C_{Th} 는 유기물의 농도로부터 계산된 Coulomb의 양이다. 각 C_{Ex} 와 C_{Th} 는 아래의 식에 의하여 계산되었다.

$$C_{Ex} = \sum_{i=1}^T (V_i I_i / R) \quad (식 5)$$

$$C_{Th} = F b M v \quad (식 6)$$

위 식에서 F는 Faraday's constant(96,485 C/mol e⁻), b는 당량계산 시 사용되는 전자의 수, M은 유기물의 농도(mol/L), v는 샘플의 부피(L)이다.

Ag/AgCl 표준 전극(0.195 V; NHE)을 산화전극 또는 환원전극 미디어 병에 넣어 각각의 포텐셜을 측정하였고 계산은 (식 7)과 같다.

$$V_{Cell} = V_{Cathode} - V_{Anode} \quad (식 7)$$

내부저항(Internal resistance, R_{int})은 electrochemical impedance spectroscopy(PC4/750 potentiostat, Gamry Instruments)를 사용하여 측정하였다. 산화전극에는 working electrode를 연결하고 환원전극에는 counter와 reference electrode를 연결 하였으며 frequency range는 10⁵에서 0.1 Hz로 하고 sinusoidal perturbation은 10 mV로 하였다.

VFAs(acetate, propionate 및 butyrate)와 알코올류(acetone, ethanol, propanol 및 butanol)는 GC-FID(Agilent, 6890)에 fused-silica capillary column(DB-FFAP 30 m × 0.32 mm × 0.5 μm)을 사용하여 분석하였다. 샘플은 0.2 μm pore-diameter의 membrane을 이용하여 여과한 후 분석하기 전에 formic acid(0.65 M)를 넣어 pH를 낮추어 주었다. 오븐의 온도는 60°C에서 120°C까지 20°C/min으로 상승시켜주고 120°C에서 240°C까지 30°C/min으로 다시 상승시켜 주어 그 온도에서 3분간 머무르게 하였다. 시료 유입부와 검출부의 온도는 250°C이고 헬륨가스를 carrier gas로 이용하였다(압력: 103 kPa).

총 carbohydrate농도는 phenol-sulfuric acid method에 의해서 분석되었다¹⁵⁾. 알칼리도, COD, TSS는 Standard Methods에 의하여 분석되었다¹⁶⁾. 용해된 유기물 분석을 위해 membrane 필터(0.2 μm pore-diameter, Pall Corp., Ann Arbor, MI)로 여과된 물을 이용하였다.

결과 및 고찰

Acetate로부터의 전기 생산

순화시간은 초기 미생물 접종시 미디어에 녹아 있는 산소

농도, 미디어, 접종액 속의 미생물 등에 따라 순화시간이 다르게 나타날 수 있다. 미생물연료전지의 산화전극 반응조(anode chamber)에 acetate를 주입한 후 혐기성 미생물로 접종하고 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)은 1 kΩ 저항과 연결하였다. 멀티미터로 시간에 따른 볼티지를 측정한 결과 25시간 이후부터 볼티지가 서서히 상승하기 시작하여 80~90시간 동안에 볼티지가 급격하게 상승하여 전압이 0.3볼트로 유지되었고 최고 볼티지 상승속도는 25 mV/h이었다(Fig. 2). 한편, acetate와 butyrate를 주입한 경우에는 50시간 만에 볼티지가 0.3 V로 안정화 되었는데(Fig. 7) 이는 전에 전기를 발생시키고 있던 미생물연료전지의 산화전극 반응조에서 활성이 있는 접종액을 취하여 접종하였기 때문에 순화시간이 짧아진 것으로 사료된다.

미생물연료전지는 acetate를 에너지원으로 이용하여 전기를 발생하였으며 주입한 acetate의 농도와 환원전극에 전달된 전자(C)는 비례하였고 발생하는 볼티지는 투여한 acetate 농도 범위에서 농도와 관계없이 일정하였다(Fig. 3 and 4). Acetate stock(0.25 M acetate) 용액 0.5 mL를 주사기를 이용하여 미생물연료전지의 산화전극 반응조에 투여하였을 때 투여 30분 만에 급격하게 볼티지가 0.32 V까지 상승하며 일정시간 유지됨을 볼 수 있었다. 같은 농도의 acetate stock 용액을 0.9 mL, 1.5 mL를 투여하였을 때도 0.325±0.003 V를 유지하였다. Acetate를 넣자마자 볼티지가 급격하게 상승한 이유는 산화전극(anode)에서 유기물(acetate)을 분해하면서 전자를 전달하는 활성화된 미생물들이 부착하여 성장하고 있기 때문이다. Fig. 3의 결과를 Fig. 2로 나타낸 결과 acetate 농도와 외부저항을 통해 흐른 Coulomb(C)의 양은 비례관계를 보였으며($y=86.964x + 21.643$; $R^2 = 1$), CE는 농도에 큰 관계없이 59.2±7.7%를 보였다. Fig. 3에서 voltage가 영으로 떨어졌을 때 acetate의 농도는 검출농도 이하이었다.

낮은 acetate 농도(8 ppm이하)에서는 발생파워가 acetate의 농도에 비례하여 선형적으로 증가하였으며 그 이상의 농

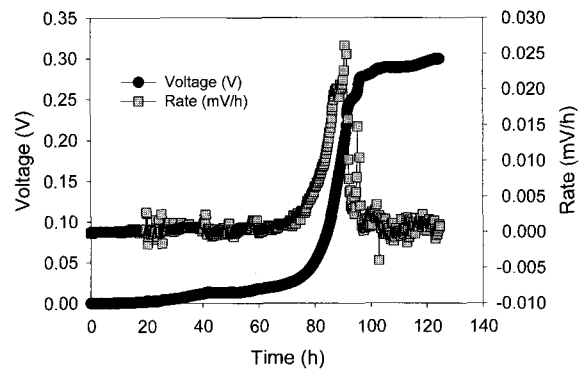


Fig. 2. Voltage generation and rate in the two-chambered MFC (external load=1000 Ω, liquid volume=250 mL, electron donor: acetate; A_{PEM} : 3.5 cm², and A_{Anode} = $A_{Cathode}$ =22.5 cm²).

도에서 발생과위의 변화는 없는 것으로 나타났다. 또한 낮은 농도에서의 CE는 높은 농도의 유기물 투여시 보다 적었으며 Acetate 농도 2, 4, 6 ppm을 투여하였을 때 생성되는 voltage는 각각 0.07 V, 0.19 V와 0.27 V이었다(Fig. 5A). 또한 그 이상의 농도에서는 0.32 V를 유지하였고, 이를 생성과위로 변환하여 그래프를 그려보았을 때 8ppm이하에서 acetate 농도에 따라 생성과위가 선형적으로($R^2=0.9854$) 증가하였다(Fig. 5B). 이는 미생물연료전지가 낮은 유기물 농도에서 BOD 센서로 응용이 가능할 것으로 판단된다. 낮은 acetate 농도인 2 ppm에서 CE는 6%이었으며 높은 농도에서는 평균 53.8%의 CE보였다. 이 원인은 산화전극 반응조에 전기를 발생시키는 미생물 외에 호기성미생물, 메탄생성미생물(MPB), 황환원미생물(SRB) 및 미생물 합성 등으로 전환되는 부분이 환원전극으로 가는 전자보다 상대적으로 많기 때문에 CE가 낮아진 것으로 판단된다¹⁴⁾.

본 실험에 사용된 two chamber MFC에서 최고 발생과위는 0.1 mW이었다(Fig. 6). 이를 산화전극(anode)의 표면적

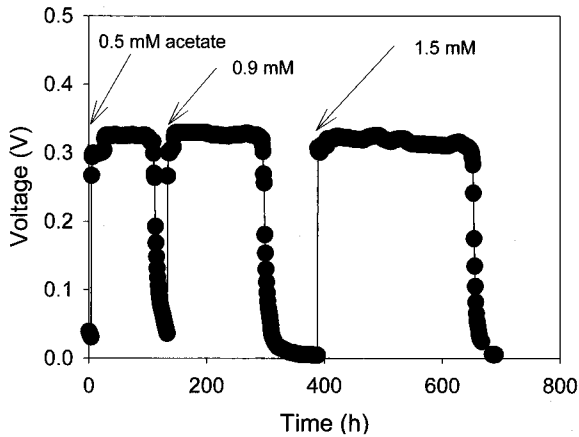


Fig. 3. Voltage generation with acetate as an energy source (external load=1000 Ω, liquid volume=250 mL, A_{PEM} : 3.5 cm², and $A_{Anode}=A_{Cathode}=22.5$ cm²).

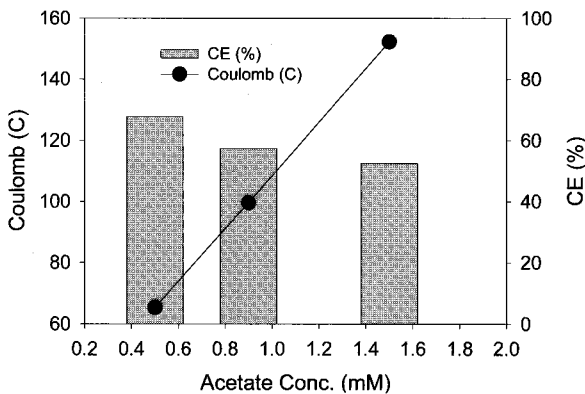


Fig. 4. Coulomb generated and Coulombic efficiency (%) as a function of acetate concentration.

으로 환산하여 계산하였을 때 45.5 mW/m²에 해당한다. Open circuit potential(OCP)은 0.8 V이었으며 최고 발생과위에서의 생성 voltage는 320 mV이었고 그때의 외부저항은 1000 Ω이었다. 이 two chamber MFC의 내부저항(internal resistance)은 1100 Ω으로 외부저항(external load)과 내부저항이 비슷한 지점에서 최고 발생과위가 발생됨을 알 수 있다⁷⁾. 동일 배지를 이용하여 다른 종류의 미생물을 본 시스템에 접중하여 운전한 결과 생성된 과위는 큰 차이를 보이지 않았다.

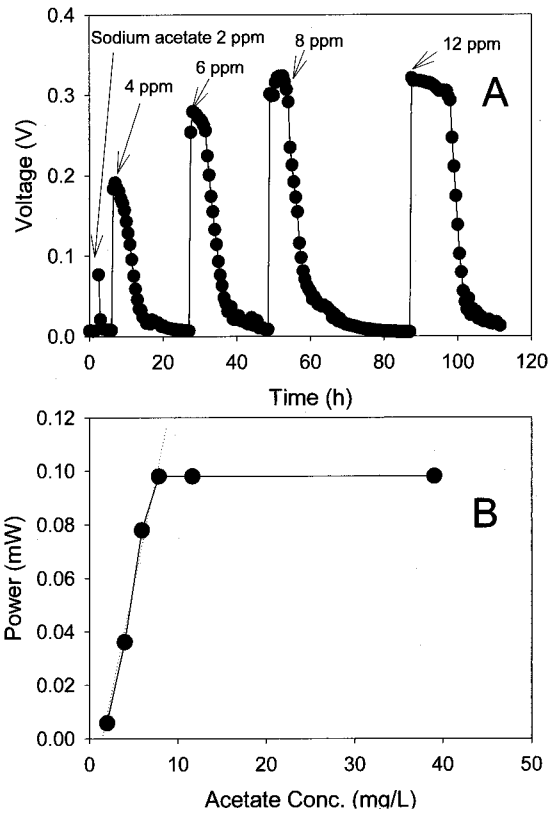


Fig. 5. Effect of acetate concentration on (A) voltage and (B) power (liquid volume=250 mL, A_{PEM} : 3.5 cm², and $A_{Anode}=A_{Cathode}=22.5$ cm²).

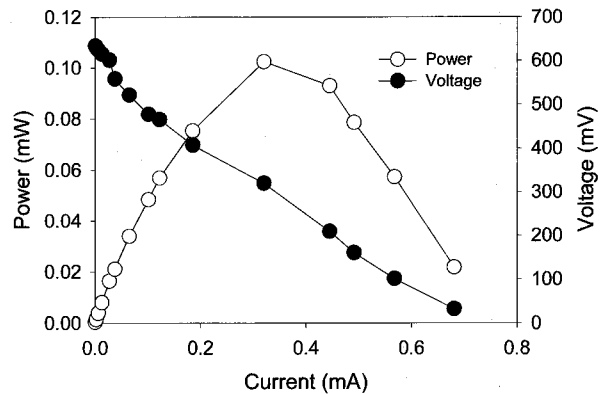


Fig. 6. Polarization curve with acetate as an electron donor in the two-chambered MFC.

Butyrate로 부터의 전기 생산

Butyrate로부터의 전기생산을 알아보기 위하여 초기에 산화전극 반응조(anode chamber)에 0.25M acetate 1 mL 와 미생물이 부착되지 않은 새로운 산화전극(anode)을 이용 하였다. 접종액으로는 acetate를 에너지원으로 사용하는 기존 미생물연료전지 산화전극 반응조(anode chamber)에서 10 mL를 취하여 운전한 결과 25시간 이후부터 voltage가 상승하였으며 50시간 이후 0.31 V를 유지하였다. voltage가 0으로 떨어진 후 93, 164시간에 0.8 mL butyrate(10 g/L sodium butyrate stock)를 넣고 200시간에 0.9 mL의 같은 용액을 주사기로 주입하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 93 시간에 butyrate를 넣었을 때 lag 시간을 보이다가 서서히 증가하고 133시간에 butyrate의 부족으로 voltage가 급격하게 떨어짐을 볼 수 있었다. butyrate를 넣었을 때 voltage가 서서히 증가한 이유는 사용된 anode가 acetate에 순화된 미생

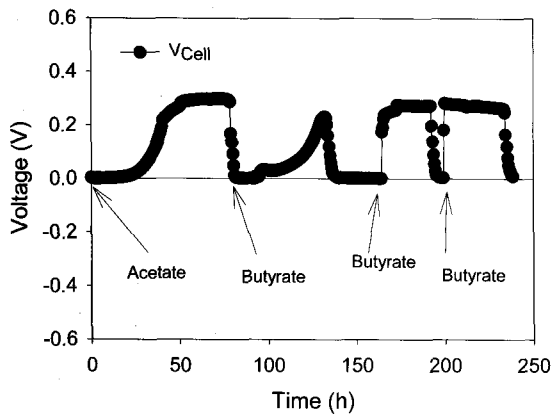


Fig. 7. Voltage profile when acetate and butyrate are spiked in the two chambered MFC (external load=1000 Ω , liquid volume=250 mL, A_{PEM} : 3.5 cm², and A_{Anode} = $A_{Cathode}$ =22.5 cm²).

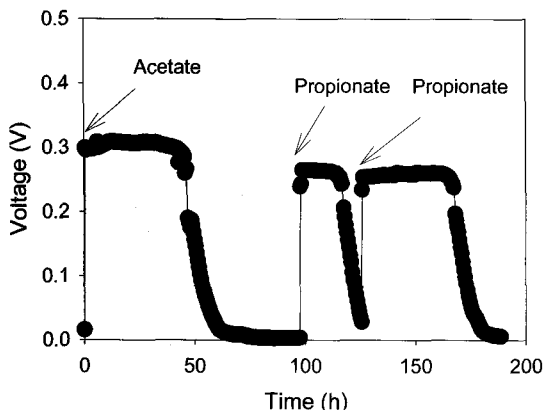


Fig. 8. Voltage generation from propionate in the two-chambered MFC (acetate: 1 M; propionate: 0.26 mM and 0.53 mM) (Test conditions: 480 Ω , liquid volume=250 mL, A_{PEM} : 6.2 cm², and A_{Anode} = $A_{Cathode}$ =22.5 cm²).

물들이 주종을 이루었기 때문에 사료된다. 93시간에 butyrate를 넣어 미생물들이 순화된 이후 164시간 이후부터는 butyrate를 주입하자마자 급격하게 voltage가 올라감을 볼 수 있었다. 이는 시간이 지나면서 butyrate를 이용하는 미생물들이 순화되었거나 또는 butyrate는 수소 농도가 아주 낮을 경우 butyrate가 acetate로 변환되므로 이 변환된 acetate가 anode에 부착하고 있는 미생물에 의해 이용되는 것으로 판단된다.

Propionate로부터의 전기생산

Fig. 8은 Butyrate와 같은 방법으로 propionate를 사용하였을 경우 생성되는 voltage를 보여주고 있다. Butyrate를 넣었을 때와는 달리 propionate를 넣었을 때는 순화시간 없이 voltage가 급격하게 상승함을 알 수 있었다. 200시간 이후에 acetate를 주입하였을 때도 급격하게 0.31 V로 상승하였고 CE는 49.9±0.3%이었다(Fig. 8). 이는 산화전극에 붙어 자라는 미생물이 acetate와 propionate를 동시에 이용할 수 있는 미생물이거나 propionate를 분해하는 미생물이 anode에 같이 붙어 자라고 있음을 시사한다.

식품공장폐수로부터의 전기생산

본 실험에 사용된 이유식 폐수시료의 COD는 8,920±152 mg/L, dissolved COD(DCOD)는 5,950±119 mg/L, total sugar는 7,170 mg/L이었고, 폐수에 용존해 있는 유기물 성분이 아주 높으면서 부유 상태의 유기물 또한 많은 폐수의 성상을 지니고 있었다. 암모니아성질소의 농도는 0.5 mg/L 이하 이었으며 초기 폐수 시료 내에 acetate 139±12 mg/L, 에탄올 221±24 mg/L를 함유하고 있고 기타 propionate, butyrate 등 일부 낮은 농도의 휘발성지방산(VFAs)과 알코올을 함유하고 있었다.

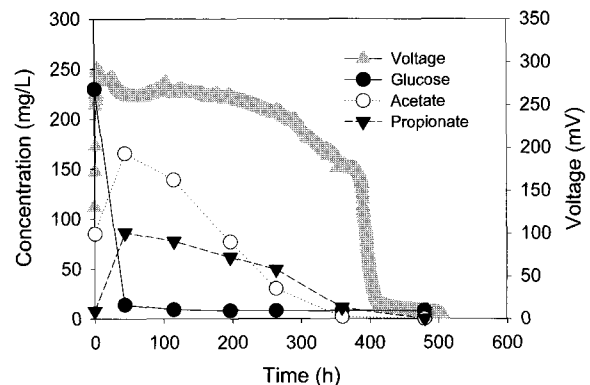


Fig. 9. Electricity generation using a two-chambered MFC from the food-processing wastewater, and changes of sugar, organic acid, and alcohol concentrations in the liquid in the anode bottle over time (Test conditions: 480 Ω , liquid volume=250 mL, A_{PEM} : 6.2 cm², and A_{Anode} = $A_{Cathode}$ =22.5 cm²).

Fig. 9는 two chamber MFC에서 시간에 따른 voltage 변화와 유기물의 변화를 각각 나타내었다. 폐수의 COD 농도가 $8,920 \pm 152$ mg/L로 아주 높기 때문에 짧은 시간 내에 폐수의 제거를 보기 위해 10배 희석하여 사용하였다. 산화전극(anode)에는 이미 전기발생 미생물이 접종된 카본전극(carbon electrode)을 사용하였기 때문에 폐수를 넣자마자 전기가 급속도로 상승되는 것을 볼 수 있었다. 그 후 voltage가 어느 정도 유지되다가 400시간 이후 급하게 voltage가 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 운전 50시간 까지 투여된 glucose의 농도가 감소함과 동시에 acetate와 propionate가 빠른 속도로 생성되었는데 이는 유기물이 발효에 의해 생성되었음을 알 수 있었다. 그 후로는 서서히 acetate와 propionate 농도가 감소하다가 Fig. 9에서 voltage가 급격하게 감소되는 시점에서 유기물의 농도는 아주 낮고 그때의 유기물 농도는 DCOD < 30 mg/L이었다. 이로서 본 실험에 사용된 MFC가 투여 유기물의 95%이상의 제거효율을 보이면서 동시에 전기가 발생됨을 알 수 있었다.

적 요

미생물연료전지는 유기성 폐기물을 처리하면서 동시에 전기에너지를 얻을 수 있다는 측면에서 커다란 장점을 가지고 있다. 대부분의 유기성폐기물들이 발효과정을 거치면서 고농도의 VFAs가 생성되므로 미생물연료전지가 이들 VFAs로부터 전기를 얻을 수 있는지 알아보는 것은 아주 중요하다. 따라서 본 연구에서는 acetate, propionate, butyrate 및 실제 폐수인 식품가공폐수로부터 미생물 연료전지를 이용하여 전기 발생 여부를 알아보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다. 미생물연료전지를 이용하여 VFAs(acetate, propionate, butyrate)와 식품가공폐수로부터 전기를 얻을 수 있었고 투여한 acetate 농도에 비례하여 cathode로 전달되는 전자(Coulomb)는 비례하였다. 낮은 농도의 acetate에서 발생과위와 acetate 농도 사이에는 비례관계를 보였다. 이는 미생물연료전지가 낮은 농도의 유기물을 측정하는 센서로서의 가능성을 보여준다. acetate에 순화된 산화전극에 butyrate를 넣었을 때 순화의 시간이 필요하였으며 일정 순화시간 후 voltage가 증가하였다. 그러나 propionate를 넣었을 때는 순화시간 없이 급격하게 voltage가 상승하였다. 따라서 미생물연료전지의 생성과위가 향상된다면 유기성 폐기물을 처리하면서 실생활에 이용할 수 있는 전기로 변환하는 장치로서 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-331-F0008) 및 강원대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었으며 기

기분석은 강원대학교 농업과학연구소의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Ministry of Environment. (2004) Statistics year-book, Republic of Korea.
2. Wen, C., Huang, X., and Qian, Y. (1999) Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration, *Process Biochem.* 35, 335-340.
3. Water Environment Research Foundation. (1999) Research needs to optimize wastewater resource utilization. Project 98-CTS-1. 4-5.
4. Grady, C. P. L., Daigger, G. T., and Lim, H. C. (1999) Biological wastewater treatment: Biological nutrient removal. Marcel Dekker, Inc. New York, USA, p.487.
5. 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, 483-485.
6. Liu, H., Ramnarayanan, R., and Logan, B. E. (2003) Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell, *Environ. Sci. Technol.* 38, 2281-2285.
7. Oh, S., Min, B., and Logan, B. E. (2004) Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells, *Environ. Sci. Technol.* 38, 4900-4904.
8. Cai, M., Liu, J., and Wei, Y. (2004) Enhanced biohydrogen production from sewage sludge with alkaline pretreatment, *Environ. Sci. Technol.* 38, 3195-3202.
9. van Ginkel, S. W. and Logan, B. E. (2005) Increased biological hydrogen production with reduced organic loading, *Water Research* 39, 3819-3826.
10. Park, W., Hyun, S. H., Logan, B. E., and Kim, I. S. (2005) Removal of headspace CO₂ increases biological hydrogen production, *Environ. Sci. Technol.* 39, 4416-4420.
11. Nandi, R. and Sengupta, S. (1998) Microbial production of hydrogen: an overview, *Crit. Rev. Microbiol.* 24 (1), 61-84.
12. Benemann, J. (1996) Hydrogen biotechnology: Progress and prospects, *Nature Biotech.* 14, 1101-1103.

-
13. 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, 4040-4046.
 14. Kim, J. R., Cheng, S., Oh, S.-E., and Logan, B. E. (2007) Power generation using different cation, anion and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells, *Environ. Sci. Technol.* 41 (3), 1004-1009.
 15. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., and Smith, F. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances, *Anal. Chem.* 28 (3), 350-356.
 16. American Public Health Association. (1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th edition. American Public Health Association. Washington DC, USA.
-