

미생물연료전지의 가축분뇨 처리 가능성 연구

장재경^{1*} · 김세희^{1,2} · 유영선¹ · 이성현¹ · 김종구¹ · 강연구¹ · 김영화¹ · 최정은¹
¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 에너지환경공학과, ²시립대학교 에너지환경시스템공학과

Studies on a Feasibility of Swine Farm Wastewater Treatment using Microbial Fuel Cell. Jang, Jae kyung^{1*}, Se Hee Kim², Young Sun Ryou¹, Sung Hyoun Lee¹, Young Goo Kang¹, Young Hwa Kim¹, and Jung Eun Choi¹. ¹National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon 441-707, Korea, ²University of Seoul, Energy and Environmental System Engineering, Seoul 130-743, Korea – In this study the feasibility of simultaneous electricity generation and treatment of swine farm wastewater using microbial fuel cells (MFCs) was examined. Two single-chamber MFCs containing an anode filled with different ratio of graphite felt and stainless-steel cross strip was used in all tests. The proportion of stainless-steel cross strip to graphite felt in the anode of control microbial fuel cell (CMFC) was higher than that of swine microbial fuel cell (SMFC) to reduce construction costs. SMFCs produced a stable current of 18 mA by swine wastewater with chemical oxygen demand (COD) of 3,167±80 mg/L after enriched. The maximum power density and current density of SMFCs were 680 mW/m³ and 3,770 mA/m³, respectively. In the CMFC, power density and current density was lower than that of SMFC. CODs decreased by the SMFC and CMFC from 3,167±80 to 865±21 and 930±14 mg/L, achieving 72.7% and 70.6% COD removal, respectively. The suspended solid (SS) of both fuel cells was also reduced over 99% (4,533±67 to 24.0±6.0 mg/L). The concentration of nutritive salts, NH₄⁺, NO₃⁻, and PO₄³⁻, dropped by 65.4%, 57.5%, and 73.7% by the SMFC, respectively. These results were similar with those of CMFC. These results show that the microbial fuel cells using electrode with mix stainless-steel cross strip and graphite felt can treat the swine wastewater simultaneously with an electricity generation from swine wastewater.

Key words: Microbial fuel cell, swine wastewater, electricity, ammonium, nitrate, phosphate

서 론

가축분뇨(양돈)는 유기물 뿐만 아니라 질소와 인의 농도가 높은 폐수로 처리가 쉽지 않으며, 악취로 인하여 끊임없이 민원을 야기하고 있다. 또한 가축분뇨가 혐기 분해되는 과정에서 발생하는 메탄가스는 이산화탄소 보다 20~25배 더 높은 온난화 효과가 있는 것으로 알려져 있어 이에 대한 처리가 시급한 상황이다[2]. 지금까지는 이들 가축분뇨를 해양 투기를 하거나 수거하여 공동처리 시설에서 처리하였다. 우리나라 가축분뇨는 연간 43,915천 톤 정도 발생되며, 처리는 고액분리 후 분은 퇴비화하고 액비는 질소비료 대체제로 이용하는 방법 등을 주로 이용하고 있으나 일정하지 않은 질소 농도와 다른 이온들을 포함하고 있고 통일된 시비가 없어 중금속오염 등의 문제와 더불어 양분의 문제를 야기할 수 있다[17].

미생물연료전지 이용 기술은 하·폐수 처리와 동시에 전

기에너지를 생성시킬 수 있는 친환경 신기술로 하·폐수에 포함된 유기오염물질의 처리와 동시에 바이오 에너지를 생성하는 지속 가능한 기술로 제안되었다[1, 4, 5, 10, 11, 12, 14]. 미생물연료전지는 음극부에 미생물을 이용하기 때문에 미생물에 의해 분해 가능한 모든 물질을 대상으로 할 수 있으며 미생물이 대사하는 과정에서 발생하는 전자를 이용하여 전기에너지를 생성할 수 있는 시스템이다. 미생물연료전지는 미생물을 이용하기 때문에 적절한 농화배양 단계를 거치면 다양한 폐수를 대상으로 이용할 수 있다. 미생물연료전지는 유기오염물질을 포함하는 하·폐수 뿐만 아니라 황산이온, Cr⁶⁺, Nitritotriacetic acid(NTA) 등 독성물질을 처리하고 동시에 전기에너지를 발생할 수 있음이 여러 연구 그룹에서 발표되었다[6, 9, 15]. 그러나 미생물연료전지는 다양한 폐수로부터 전기에너지를 얻을 수 있다는 장점에도 불구하고 전극, 멤브레인 그리고 촉매 등 사용되는 재료들이 고가로 초기 투자비용이 크다는 것과 scale-up을 하면 내부 저항이 커져 출력 에너지 양이 적어지는 문제가 있다. 따라서 경제성이 있는 미생물연료전지로 개발하기 위해서는 고가의 전극과 멤브레인을 저가의 재료로 대체해야 한다. 이러한 시도로 스테인레스 스틸판을 전극으로 사용하거나[3] 고가의

*Corresponding author

Tel: 82-31-290-1815, Fax: 82-31-290-1840

E-mail: jkjang1052@korea.kr

멤브레인을 glass wool과 glass bead로 대체한 연구 결과가 발표되었으나 전류값은 높지 않았다[5].

지금까지 높은 유기오염농도와 암모니아성 질소를 포함하는 가축분뇨를 이용하는 미생물연료전지 연구는 미비한 상태인데 [7], 2007년 Kim은 미생물연료전지를 이용한 nitrogen 제거는 single-process system에서는 어려우며 일반적으로 2 단계 변형 포기조/무산소조(oxic/anoxic) process와 같이 multiple반응조를 이용하여 ammonia-rich 가축분뇨 처리에 이용할 수 있으나 이들 process는 높은 운전비용이 요구된다고 하였다[8]. 그러나 미생물연료전지를 실용화하기 위해서는 멤브레인과 같이 고가 재료를 대체해야 하며 시스템이 단순화한 single system 이 적합할 것으로 생각되어 본 연구에서는 미생물연료전지를 single-chamber형태로 탄소섬유 전극과 스테인레스 스틸망을 혼합하여 전극으로 사용하였으며 멤브레인을 아크릴판으로 대체하여 가축분뇨에 포함된 유기 오염물질, 질소 그리고 인의 분해능 정도와 이 과정에서 전기에너지 생성 정도를 알아보고자 한 것이다.

실험 재료 및 방법

미생물연료전지의 구조 및 운전조건

농촌부산물 중 가축분뇨(액비)을 이용하여 처리와 동시에 전기에너지를 생성하는 미생물연료전지(Swine microbial fuel cell, SMFC)를 개발하기 위하여 직사각형의 형태로 음극부와 양극부를 하나의 챔버에 위, 아래에 장착시키고 액비를 음극부에 공급하면 음극부를 통해서 양극부에서 배출되도록 하였다. 음극부는 가로×세로×높이가 230×150×150 mm 이며, 양극부 위에 바이오필터를 장착하여 발생하는 냄새를 처리할 수 있도록 하였다(Fig. 1).

이 실험에서는 음극부와 양극부 사이에 고가의 양이온 교환막(멤브레인)을 이용하는 대신 절연상태를 유지하면서 선택적으로 수소이온을 전달시킬 수 있는 세퍼레이터를 장착하여 연결하였다. 이 세퍼레이터는 유체의 흐름을 방해하지

않도록 perforated plate 형태로 하였다. 음극부 전극으로는 탄소섬유전극(graphite felt, GF series, Electrosynthesis, amherst, NY, USA)와 함께 스테인리스스틸 cross stripes를 함께 사용하였다. 탄소섬유 전극 3장과 나머지를 스테인스틸 cross stripes sheet(23장)을 충전한 것을 대조구(Control microbial fuel cell, CMFC)로 하고 탄소섬유전극 16장과 스테인스틸 cross stripes sheet(10장)을 충전한 측정용 미생물 연료전지(Swine microbial fuel cell, SMFC)를 서로 비교하여 실험하였다. 양극부전극은 백금촉매(Platinum powder)를 탄소(carbon)에 첨가한 파우더(20% platinum on Vulcan XC-72, E-TEK, NJ, USA)를 Nafion ionomer와 함께 섞어 분산매를 만든 후 전극표면에 스프레이건을 이용하여 로딩(평균 0.38±0.04 mg/cm²)한 전극 2장을 양극부 전극으로 사용하였다. 대조구(CMFC) 미생물연료전지와 측정용 미생물 연료전지의 음극부에는 가축분뇨를 희석하지 않고 원액 그대로 이용하였으며, 양극부에는 에어컴프레서를 이용하여 유량계(flow meter)를 거쳐 일정 유량(800 mL/min)으로 연속 공급되도록 하였다. 폐수 공급은 연동펌프(505S, Watson-Marlow, Falmouth, Cornwall, UK))를 이용하여 53.26 mL/min의 유속으로 일정하게 음극부(부피: 3637±23 mL)의 하단으로 공급하여 상단의 양극부를 통해서 배출되도록 하였다. 이때 체류시간은 전극을 충전 후의 반응기 부피를 기준으로 하였다. 연료(액비)는 COD농도가 높기 때문에 SMFC와 대조구는 각각 별도의 저류조에 연결하여 액비 5L를 순환(recycle)시키면서 전류발생의 변화와 가축분뇨의 처리 정도를 알아보았다. 유입된 액비는 배출구에서 다시 저류조에 유입되는 시스템으로 전류값이 감소되면 배지를 교체하여 주었다. 미생물연료전지 모두 온도가 일정하게 조절되는 챔버에서 운전하였으며, 온도는 31°C를 유지하였다.

접종 및 농화배양

접종원으로는 중량하수처리장의 혐기소화조 슬러지와 이천시에 소재한 양돈 농가로에서 채취한 가축분뇨를 부피비(1:1)로 혼합하여 접종원으로 사용하였다. 접종액 100 mL을 phosphate buffer(1 M) 30 mL + mineral solution(10 mL) + salt solution(10 mL)를 혼합하여 최종 1 L가 되도록 하여 이 액을 접종액으로 이용하였다[5]. 펌프를 이용하여 53.26 mL/min의 유속으로 주입하면서 미생물연료전지의 음극부 전극에 충분히 접촉할 수 있도록 하였다[5]. 접종은 접종액을 유입한 후 전압의 변화가 발생하는 것을 확인한 후 약 1시간 정도 더 접종액을 유입한 후 멈추었다. 전기활성미생물을 농화배양하기 위하여 10 ohm의 저항을 연결하고 다시 액비를 53.26 mL/min의 유속으로 공급하였다. 이때 전압을 측정하여 농화배양이 되었는지의 여부를 판단하였다.

폐수

돈사(이천)에서 발생하는 액비를 사용하였으며 액비의 화

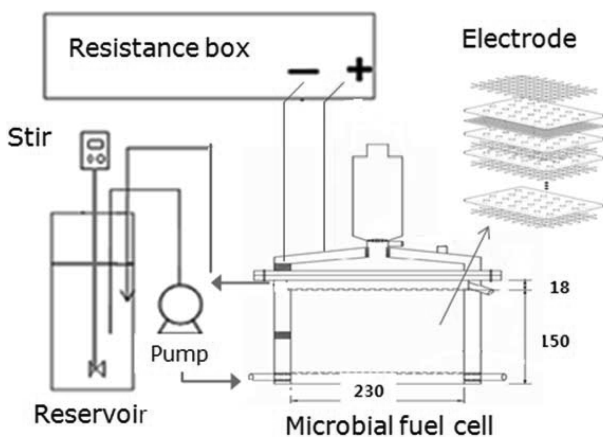


Fig. 1. Schematic diagram of microbial fuel cell.

학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD)는 약 3,200 ppm이었으며 수소이온농도(pH)는 약 8.1이었다. 또한 가축분뇨의 총질소와 총인은 각각 $1,386.1 \pm 117$ 와 880.0 ± 0.0 mg/L이었다. 액비는 미생물연료전지에 희석이나 멸균 등 다른 처리를 하지 않은 상태로 주입하였다.

전류발생 측정 및 폐수 분석

각 미생물연료전지에서 발생하는 전류값을 측정하기 위해서는 multimeter(Keithley Instrument Inc., Cleveland, OH, USA)로 일정 시간 마다 양극부와 음극부 사이의 potential 차이를 측정하였다. 측정된 potential(전압)은 컴퓨터(personal computer)로 전달하고 측정된 potential은 고정된 외부 저항 값을 고려하여 환산하였다. 액비의 COD는 HACH의 3개의 서로 다른 농도범위(0-150(LR), 0-1,500(MR), 0-15,000(HR) ppm)의 kit를 사용하여 측정하였다. 흡광광도계는 HACH의 DR5000 UV-VIS Spectrophotometer(HACH, Loveland, CO, USA)를 이용하였다. 부유물질농도(SS)는 공정시험법에 따라 미리 무게를 단 유리섬유여지(GF/C)를 여과기에 부착하여 일정량의 시료를 여과시킨 다음 건조하여 무게를 달아 여과 전·후의 유리섬유 여지의 무게차를 산출하여 부유물질의 농도를 구하여 산출하였다[16]. 암모니아성질소는 Nessler Method를 이용하여 425 nm에서 흡광도를 측정하였으며, 질산성질소(NO_3^-)는 chromotropic acid method에 의해 410 nm에서 흡광도를 측정하였다. 총질소는 105°C 에서 30분간 전처리 후 410nm 흡광도에서 측정하였으며 인산염인은 ascorbic acid method로 880nm에서 흡광도를 측정하여 측정하였다. 암모니아성질소(Nessler reagent set), 질산성질소(Test'N Tube, HR, NitroVer X Test N tube reagent set) 총질소(Test 'N Tube, HR Total nitrogen acid solution reagent set), 그리고 인산염인(PhosVer3 Phosphate reagent) 분석은 모두 HACH kit를 이용하여 DR 5000 UV-VIS spectrophotometer를 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

농화배양

혐기소화조액과 가축분뇨(양돈)을 1:1로 혼합한 액을 접종 원으로 하여 미생물연료전지에 일정한 유속으로 공급하였다. 음극부 용량으로 2회 정도가 교체되었을 때 공급을 중단하고 1일이 경과하였을 때 액비를 53.26 mL/min의 유속으로 공급하면서 CMFC와 SMFC의 전류발생 양상을 관찰하였다(Fig. 2). 접종 후 SMFC는 약 2일이 지나면서 전류발생이 시작되어 약 7일이 되었을 때 steady state에 도달하여 일정한 전류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 스테인레스 스틸 cross stripes가 많이 충전된 대조구(CMFC) 미생물연료전지는 SMFC보다 steady state 상태에 도달하는데 더 많은 시간이 소요되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전류 발

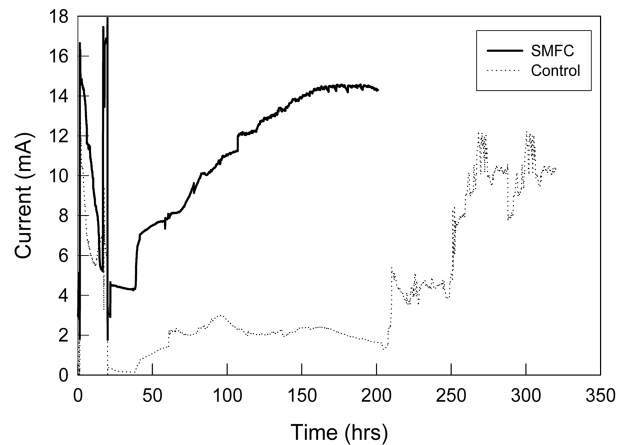


Fig. 2. Current generation on the enrichment stage.

생값도 10 mA로 정도로 SMFC의 약 16 mA보다 낮게 발생되었다.

SMFC의 농화 배양에 소요되는 시간이 짧은 이유는 탄소 섬유전극은 fiber를 뭉쳐 압축한 것으로 단위면적당 넓은 표면적을 갖고 있어 미생물이 고정화하는데 더 용이할 뿐 만 아니라 미생물이 더 많이 부착될 수 있는 환경이기 때문인 것으로 판단된다.

미생물연료전지를 이용한 가축분뇨 처리

SMFC의 전류값이 최대 약 16 mA정도로 일정하게 유지될 때 농화 배양이 완료되었다고 판단하여 전류발생 및 화학적 산소 요구량(COD) 및 부유물질(SS)을 분석하였다. 공급한 액비의 초기 COD농도는 $3,167 \pm 80$ mg/L이었으며 6일이 경과하였을 때 SMFC와 대조구는 각각 865 ± 21 mg/L와 930 ± 14 mg/L로 감소하였다. SMFC와 CMFC의 COD 제거 효율은 각각 72.7%와 70.6%로 비슷한 처리능을 보였다(Fig. 3(A)).

CMFC의 경우, 농화배양 단계에서 정상상태(steady state)에 도달하는 시간은 오래 걸렸지만 COD제거효율은 크게 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 이 결과는 미생물연료전지를 하·폐수 처리를 목적으로 하는 경우 스테인레스 스틸 cross stripes도 전극 재료로 충분히 사용 가능함을 보인 것으로 스테인레스 스틸 cross stripes를 저가의 전극 재질로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 미생물연료전지에 공급된 액비의 COD 농도는 865 ± 21 mg/L와 930 ± 14 mg/L로 감소된 후 3일이 더 경과하여도 더 이상 감소하지 않았다. 이것은 폐수 속에 포함된 액비에 분해 불가능한 COD(ICOD)를 포함하고 있는 것이 그 원인인 것으로 생각된다. 2004년 Min은 미생물연료전지를 이용하여 가축분뇨에 포함된 암모니아성 질소 제거 연구에서 가축분뇨에 포함된 $1,820 \pm 83$ mg/L의 COD 농도가 250 ± 29 mg/L로 약 86%가 제거되었다고 발표하였는데 이때 COD를 soluble COD로 나타냈

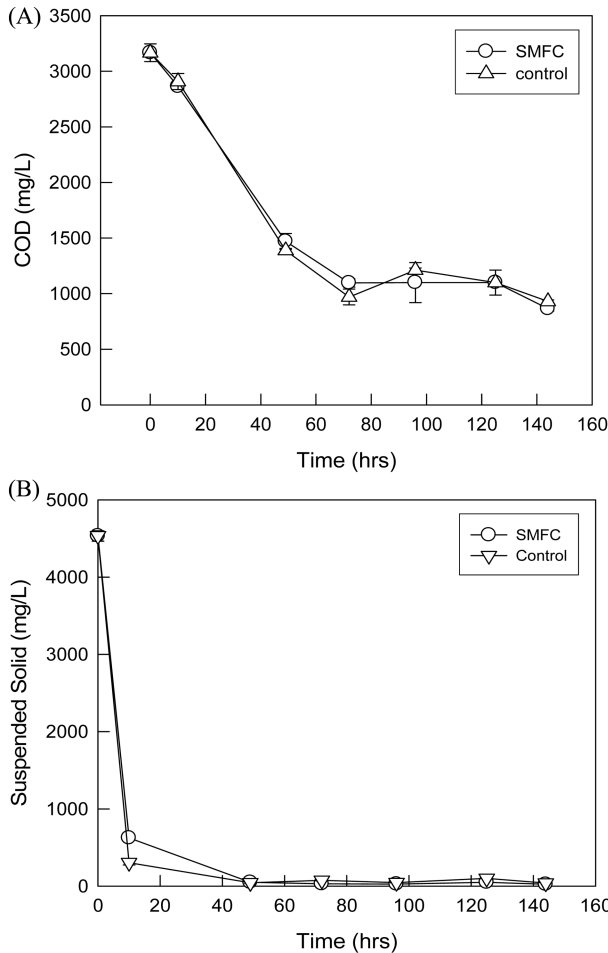


Fig. 3 Change of chemical oxygen demand (COD) and suspended solid (SS) after enriched microorganisms on the electrode. A: COD, B: SS.

다[13]. 실제로 가축분뇨의 ICOD와 SCOD는 각각 약 75%와 25%으로 많은 양의 ICOD를 포함하고 있어 미생물에 의해 제거가 안되거나 시간이 오래 걸리는 물질로 인해 유출되는 COD농도가 감소하지 않은 것으로 생각된다. 부유물질(SS)는 4,533±67 mg/L에서 24.0±6.0 mg/L으로 99.5%까지 감소한 것으로 나타났다(Fig. 3(B)). Jang은 미생물연료전지로부터 발생하는 부유물질의 양을 호기적 처리법과 비교하여 이론적으로 1/3 이하로 감소된다는 연구결과를 발표하여 하·폐수 처리에 생물연료전지를 이용할 경우 부유물질 처리에 경제적 효과를 기대할 수 있을 것으로 나타났다[5]. 본 연구결과에서도 미생물연료전지를 이용하여 가축분뇨를 처리시 부유물질의 생성이 낮은 것을 확인할 수 있었다.

미생물연료전지(Swine Microbial Fuel Cell, SMFC)의 전력

농화배양 이후 전류 발생이 안정화되었을 때 액비를 에너지원으로 사용되는 미생물연료전지로부터 생성되는 전력생산 특성을 알아보기 위해 polarization curve를 작성하였다(Fig. 4). 전류발생은 SMFC와 대조구(CMFC) 각각 약 160

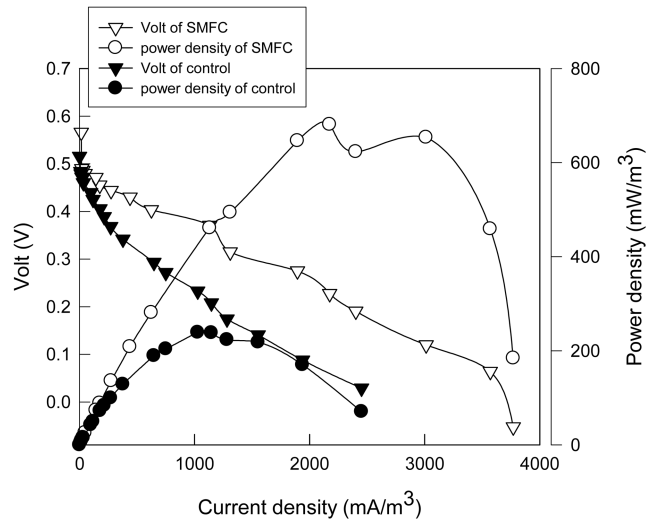


Fig. 4. Polarization curve and power density curve of the microbial fuel cell using swine wastewater as fuel.

mV와 약 100 mV ($R = 10\text{WWW}$)이었다. 이때 maximum power density는 680 mW/m³, 최대전압은 0.6V로 나타났으며 current density는 3,770 mA/m³으로 나타났다.

Polarization curve에서 나타난 바와 같이 SMFC의 경우에는 mass transfer loss가 나타나는 영역, 즉 높은 전류 밀도에서 전압강하가 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 액비(연료)를 재순환하면 시간이 지남에 따라 유기오염물질의 농도가 낮아진 것이 원인이라 생각된다.

질소농도 및 인산농도의 변화

액비는 유기오염물질과 함께 질소나 인도 다량 포함하고 있어 미생물연료전지를 이용한 이들 처리능을 알아보았다. 미생물연료전지를 운전하면서 암모니아성 질소(NH_3^+), 질산성질소(NO_3^-)의 농도 변화를 측정하였다(Fig. 5).

액비의 총질소(TN), 암모니아성 질소(NH_3^+), 그리고 질산성 질소(NO_3^-)의 농도는 각각 2575.0±35.4 mg/L, 880±0.0 mg/L, 그리고 57.5±0.0 mg/L이었다. 질산성 질소보다는 암모니아성 질소와 아질산성 질소(= 총질소-암모니아성질소-질산성질소)가 높은 것으로 질산화가 진행된지 오래되지 않았음을 확인할 수 있었다. 미생물연료전지를 이용하여 이들 각 농도 변화를 관찰한 결과, 암모니아성 질소(NH_3^+)는 초기농도가 880±0.0 mg/L에서 10시간 이후 622.5±10.6 mg/L으로 29.3%가 제거되고 이후 점진적으로 제거되어 6일이 지났을 때 304.5±2.1 mg/L으로 65.4%가 제거되었다. Kim은 그의 연구에서 유가식(fed batch cycle)으로 운전한 미생물연료전지에서 암모니아성 질소가 188±6 mg/L에서 76±8 mg/L로 약 60% 제거 되었다고 발표한 연구결과보다 더 많이 제거되는 것을 확인할 수 있었다[8]. 질산성질소(NO_3^-)의 경우, 초기 57.5±0.0 mg/L에서 20.7±1.5 mg/L로 감소하여 57.5%가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 미생물연료전지에서의

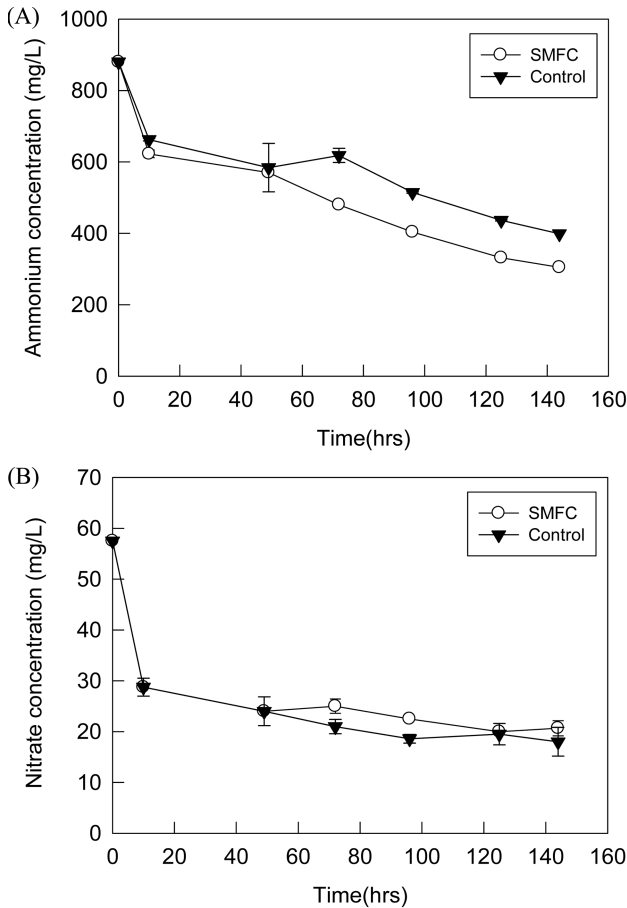


Fig. 5. Variations of ammonium and nitrate concentration included swine wastewater.

암모니아성 질소의 제거는 탈질과 질산화 두 작용에 의한 것으로 판단된다. 이것은 음극부에 공급된 액비가 상향류(up-flow)되어 양극부(1 cm 정도)를 통해서 배출되는 과정에서 혐기적인 환경에서 탈질 반응이 일어나고, 양극부를 거쳐 배출되는 과정에서 양극부에 공급한 산소에 의해 질산화가 일어나는 것이다. 질산성 질소는 57.5 ± 0.0 mg/L에서 20.7 ± 0.0 mg/L으로 64.1%가 제거되었으나 질산성질소는 음극부에서 전자수용체(electron acceptor)로 작용할 수 있기 때문에 질산성질소 농도가 감소하는 것으로 생각된다. 그러나 이러한 현상은 전자가 전자수용체에 의해서 소모되기 때문에 전류 발생량이 낮아지는 원인이 될 것이다. 따라서 이에 대한 대책이 필요할 것으로 사료된다. 대조구(CMFC)의 암모니아성 질소는 880.0 ± 0.0 mg/L에서 399.0 ± 0.0 mg/L으로 54.7%가 제거되었으며, 질산성질소는 57.5 ± 0.0 mg/L에서 18.0 ± 2.8 mg/L으로 68.7% 제거되었다. 암모니아성 질소와 질산성질소의 제거율이 4~10% 정도 사이에서 높거나 낮았다.

SMFC의 인산염인 농도는 초기 527.5 ± 7.1 mg/L에서 6일 후 139 ± 3.5 mg/L으로 74%가 감소 되었으며 CMFC에서는 52.7 ± 7.1 mg/L에서 104.0 ± 4.2 mg/L으로 80%가 제거되었다

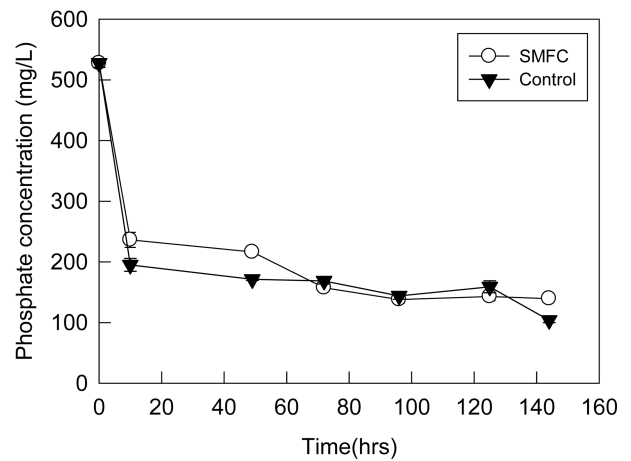


Fig. 6. Change of phosphate concentration by time.

(Fig. 6).

일반적으로 질소와 인의 처리는 각각 다른 산소 조건 상태에서 일어나기 때문에 혐기조-무산소조-호기조로 구성되어 무산소조에서 질산성질소가 질소로 방출되고, 호기조에서 인이 미생물에 의해서 섭취되어 제거되는데 미생물연료전지를 이용할 경우에는 음극부 즉, 같은 반응조 안에서 암모니아성 질소와 인산염 인이 동시에 감소하는 것으로 나타났다. 또한 폐수처리장에서 질소와 인을 처리할 때는 적당한 BOD와 TP와 TN의 비가 요구된다. 따라서 TP와 TN을 효율적으로 제거하기 위해서는 적절한 BOD:N:P의 비를 고려한다면 유기오염물질 처리 속도 높아질 것으로 판단된다. 미생물연료전지는 유기오염물질과 함께 질소염과 인산염인을 모두 한 개의 반응조(음극부)안에서 동시에 제거가 가능한 시스템으로 전기에너지와 함께 폐수처리가 가능한 시스템으로 이용 가능할 것으로 생각된다.

요 약

본 연구는 미생물연료전지를 이용하여 액비를 처리하고 동시에 유용한 전기에너지 발생이 가능한지를 실험한 것이다. 탄소섬유전극(graphite felt)와 스테인레스 스틸망을 다른 비율로 충전한 single-chamber 미생물연료전지를 이용하였으며 탄소섬유전극보다 스테인레스망을 더 많이 충전한 미생물연료전지를 대조구(CMFC)로 하여 탄소섬유전극이 더 많이 충전된 미생물연료전지(SMFC)와 서로 비교하였다. 농화 배양이 끝난 후, SMFC로부터 발생하는 전류는 3.167 ± 80 mg/L의 액비를 공급할 때 18 mA가 안정적으로 발생되었다. 이때 최대 전력밀도와 전류밀도는 각각 680 mW/m^3 와 $3,770 \text{ mA/m}^3$ 이었으며, CMFC의 전력밀도와 전류밀도보다는 높았다. 화학적산소요구량(COD)는 SMFC와 CMFC에서 $3,718 \pm 80$ mg/L에서 865 ± 21 과 930 ± 14 mg/L로 감소하여 각각 72.7%와 70.6%가 감소되었다. SMFC와 CMFC로부터 부유

물질(SS)은 99% 이상이 감소되는 것을 확인하였다. 또한 SMFC의 암모니아성질소, 질산성질소, 그리고 인산염인과 같은 영양물질 농도의 변화도 각각 65.4%, 57.5%, 그리고 73.7%이 감소되었으며 CMFC의 경우도 거의 유사한 제거율을 보였다. 이들 결과로부터 저가 재료가 충전한 미생물 연료전지를 이용함으로써 경제적 효과를 기대할 수 있음은 물론 가축분뇨로부터 적지만 전기 에너지가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2009년 농촌진흥청 아젠다 에너지절감기술 및 바이오에너지개발(PJ006411)의 지원을 받아 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Angenent, L., K. Karim, M. H. Al-Dahhan, B. A. Wrenn, and R. Domínguez-Espinosa. 2004. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol.* **22**: 477-485.
2. Cho, K. S. and H. W. Ryu. 2009. Biotechnology for the mitigation of methane emission from landfills. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **37**: 293-305.
3. Dumas, C., A. Mollica, D. Feron, R. Basseguy, L. Etcheverry, and A. Bergel. 2007. Marine microbial fuel cell: Use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials. *Electrochimica acta.* **53**: 468-473.
4. Gil, G. C., I. S. Chang, B. H. Kim, M. Kim, J. K. Jang, H. S. Park, and H.J. Kim. 2003. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosens. Bioelectron.* **18**: 327-324.
5. Jang, J. K., T. H. Pham, I. S. Chang, K. H. Kang, H. Moon, K. S. Cho, and B. H. Kim. 2004. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochem.* **39**: 1007-1012.
6. Jang, J. K., I. S. Chang, H. Moon, K. H. Kang, and B. H. Kim. 2006. Nitrotriacetic acid degradation under microbial fuel cell environment. *Biotech. Bioeng.* **95**: 772-774.
7. Kim, J. R., J. Dec, M. A. Bruns, and B. E. Logan. 2008. Removal of odors from swine wastewater by using microbial fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, **74**: 2540-2543.
8. Kim, J. R., Y. Zuo, J. M. Regan, and B. E. Logan. 2008. Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating animal wastewater, *Biotechnology Bioengineering*, **99**: 1120-1127.
9. Li, Zhongjian, X. Zhang, and L. Lei. 2008. Electricity production during the treatment of real electroplating wastewater containing Cr⁶⁺ using microbial fuel cell. *Process Biochemistry.* **43**: 1352-1358.
10. Liu, H., R. Ramnarayanan, and B. E. Logan. 2004. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.* **38**: 2281-2285.
11. Logan, B. E. B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schroder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, and K. Rabaey. 2006. Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environ. Sci. Technol.* **40**: 5181-5192.
12. Lovley, D. R. 2006. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nature.* **4**: 497-508.
13. Min, B., J. R. Kim, S. E. Oh, J. M. Regan, and B. E. Logan. 2005. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cell. *Water Research.* **39**: 4961-4968.
14. Rabaey, K. and W. Verstraete. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnol.* **23**: 291-298.
15. Zhao, F., N. Rahunen, J. R. Varcoe, A. Chandra, C. Avignone-Rossa, A. E. Thumser, and R. C. T. Slade. 2008. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell, *Environ. Sci. Technol.* **42**: 4971-4976.
16. 최규철, 권오역, 김동욱, 김용환, 박광하, 이우식, 이정연, 전세진, 정수경. 2006. 수질오염공정시험방법주해. 동화기술 p. 253-255.
17. 이상복. 2007. 저농도(SCB) 액비 이용 벼 재배 기술, 작물과 학원 호남연구소 p. 7-8.

(Received Oct. 14, 2010/Accepted Nov. 24, 2010)