식중원 및 유기물 농도 변화에 따른 평판형 외기환원전극 미생물 연료전지의 질소 제거

Nitrogen Removal in Flat-Panel Air-Cathode Microbial Fuel Cell according to Various Inoculum Sources and Organic Concentration

박영현 · 유재철 · Thi Hien Nguyen · 이태호[†]

Younghyun Park · Jaecheul Yu · Thi Hien Nguyen · Taeho Lee[†]

부산대학교 사회환경시스템공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

(Received October 24, 2016; Revised December 6, 2016; Accepted December 9, 2016)

Abstract : Although microbial fuel cell (MFC) can produce electricity from organics in wastewater, nitrogen removal is required for application of process for wastewater treatment plant. This study developed flat-panel air-cathode MFCs (FA-MFCs) comprised of two large separator electrode assemblies (SEAs) and evaluate total nitrogen removal according to three inoculum sources and pre-nitrification acclimation. The nitrification efficiencies were >99% regardless of inoculum sources under the phase for pre-nitrification acclimation. The total nitrogen removal efficiencies of FA-MFCs without pre-nitrification acclimation were the highest at the low organic conditions (<300 mg-COD/L) under the phase for nitrification and denitrification. The increase of organic concentration influenced the total nitrogen removal efficiency, positively. The organics were removed >95% but were not used for heterotrophic denitrification totally. This study suggests that application of FA-MFC system for wastewater treatment can allow the simultaneous removal of organic and nitrogen compounds, although this affects the low electricity production.

Key Words : Microbial Fuel Cell, Nitrification, Denitrification, Inoculum Source

요약 : 미생물연료전지(MFC)는 하·폐수내의 유기물로부터 전기를 생산할 수 있는 획기적인 기술이지만, 실용화를 위해서는 하·폐수 내의 질소를 제거할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 두 개의 대면적 SEA (separator electrode assembly)로 구성된 평판형 외기환원전극 미생물연료전지(FA-MFC)를 이용하여 질산화 전배양의 유무와 식중원에 따른 총질소제거율을 평가하였다. 질산화 전배양 단계에서 FA-MFC의 질산화율은 식중원과는 무관하게 99% 이상을 나타냈다. 질산화 및 탈질 단계에서 300 mg-COD/L 이하의 낮은 유기물 농도에서는 전배양을 하지 않은 조건의 총질소제거율이 가장 높았다. 유기물 농도가 증가할수록 더 높은 총질소제거율을 나타냈으며, 유기물제거율은 모든 조건에서 95% 이상을 나타냈지만, 종속영양탈질에만 이용되는 것은 아니므로 판단된다. FA-MFC의 전기 발생량은 매우 낮았지만, 유기물과 질소를 동시에 제거할 수 있다는 장점이 있기 때문에 획기적인 하·폐수처리공법으로 발전시킬 수 있으리라 기대된다.

주제어 : 미생물연료전지, 질산화, 탈질, 식중원

1. 서론

미생물연료전지(microbial fuel cell, MFC)는 하·폐수의 유기물을 분해하는 동시에 전기를 생산할 수 있고, 폭기가 불필요한 혐기성 기반의 공정이기 때문에, 하·폐수처리공정의 에너지자립화에 기여할 수 있는 혁신적인 기술로 주목받고 있다.^{1,2)} 일반적으로 하·폐수 내의 낮은 유기물 농도와 전기전도도가 MFC의 주요 저해인자들로 보고되고 있으며, 이를 극복하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.³⁾ 이에 따라 다양한 형태의 MFC가 개발되어 실제 하·폐수 처리에 적용되어 왔지만, 대부분의 연구들이 유기물 제거와 전기 생산에만 초점을 맞추었다.^{4,5)} Yu 등⁶⁾은 침지형 MFC를 이용하여 하·폐수 내의 유기물을 8시간 이내의 수리학적 체류시간(hydraulic retention time, HRT) 조건에서 처리하였고, 우리나라 방류수수질기준인 40 mg-COD/L 이하의 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD)을 달성하

였다. 하지만 최근 총질소 등 영양염류에 대한 규제가 강화됨에 따라 MFC 공정을 이용하여 하·폐수 내의 질소를 처리할 수 있어야 하기 때문에 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

MFC를 기반으로 한 질소 제거는 일실형(single chamber)과 이실형(two chamber) 모두에서 가능하다고 알려져 있다.^{7,8)} 그러나 현장 적용을 위해서는 일실형, 즉 외기환원전극(air-cathode) MFC가 적합하다고 사료된다. 하·폐수 내의 질소화합물은 대부분 암모니아성 질소의 형태로 존재하기 때문에, 이를 MFC로 제거하기 위해서는 다음의 두 가지 메커니즘을 고려해볼 수 있다. 첫 번째는 암모니아 휘발(ammonia volatilization)으로써, MFC의 전기 생산 메커니즘에 따라 외기환원전극 근처의 pH가 상승하여 암모니아성 질소가 탈기되는 현상이다. Kim 등⁹⁾은 축산폐수를 처리하는 외기환원전극 MFC를 통해 이 현상을 연구하였다. 그러나 암모니아 휘발은 MFC의 전기 발생량에 크게 영향을 받

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

기 때문에,⁹⁾ 실제 하·폐수를 이용한 MFC의 낮은 전기 생산량이 제한 인자로 작용할 위험이 있다. 두 번째는 외기환원전극 MFC 내부에 질산화 및 탈질균 등을 전기생산균과 함께 식중하여 생물학적 질소제거 및 전기 생산 반응을 동시에 유도해내는 방법이다.⁸⁾ 외기환원전극을 통해 MFC 내부로 투과된 산소를 이용하여 질산화 반응이 일어나고, 하·폐수 내의 유기물을 이용하여 탈질 반응이 일어나기 때문에, 전기 생산량과는 무관하게 안정적인 질소제거율을 유지할 수 있다는 장점이 있다.¹⁰⁾ 하지만 산소의 존재로 인해 MFC의 전기 생산량이 낮으며, 특정 균을 선별적으로 식중해야 한다는 번거로움이 있다. 뿐만 아니라 투과되는 산소량에 질산화 속도가 결정된다는 단점도 있다. Yan 등⁸⁾은 100 mg-N/L의 암모니아성 질소가 90% 이상 제거되기 위해서는 10-20일이 소요된다고 보고하였다. 따라서 높은 질소 제거율을 달성하기 위해서는 산소의 투과량을 증가시킬 수 있는 구조가 필요하며, 식중원의 영향에 대한 연구 또한 반드시 수행되어야 한다.

본 연구에서는 두 개의 대면적 SEA (separator electrode assembly)로 구성된 평판형 외기환원전극 미생물연료전지 (flat-panel air-cathode MFC, FA-MFC)를 이용하여 다음의 두 운전 단계, 1) 질산화 전배양 단계와 2) 질산화 및 탈질 단계에서 식중원에 따른 영향 평가를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 식중원은 1) 아질산화, 2) 아질산화 및 혐기성 암모늄산화(anaerobic ammonium oxidation, Anammox), 3) 활성슬러지였으며, 질산화 및 탈질 단계에서는 질산화 전 배양을 거치지 않은 활성슬러지 조건을 추가하였다. 이를 통하여 질산화 전배양 단계에서는 암모니아성 질소의 산화 효율을 평가하였고, 질산화 및 탈질 단계에서는 유기물 및 총질소제거율과 전기 발생량을 평가하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. FA-MFC 구성

본 연구에서 사용된 FA-MFC는 두 개의 SEA가 마주 보도록 구성되어 있으며, 그 사이에 원활한 유체의 흐름을 유도하기 위한 배플(baffle)이 설치되었다(Fig. 1). SEA는 외곽에서부터 외기환원전극과 분리막(separator), 산화전극(anode) 순으로 배열되었고, 이 조합은 폴리카보네이트(poly carbonate)로 제작된 커버(cover)와 배플 사이에 위치하며, 누수 방지를 위하여 가스켓(gasket)을 삽입하였다. 단일 SEA의 면적은 300 cm² (15 cm × 20 cm)이었으며, 조립된 FA-MFC의 산화전극 부 부피는 150 mL이었다. 산화전극과 환원전극은 흑연펠트(graphite felt)와 탄소천(carbon cloth, E-Tek, BASF Fuel Cell, Inc., USA)을 각각 사용하였다. 외기환원전극을 제조하기 위하여 탄소천의 한 면에는 누수 방지를 위한 PTFE (polytetrafluoroethylene) 처리를, 다른 면에는 백금 촉매 처리를 하였다.¹¹⁾ 분리막은 폴리프로필렌(polypropylene) 재질의 부직포(Korea Non-Woven Tech. Co, Ltd., Korea)를 사용하였다.¹²⁾

Fig. 1. Schematic diagram of flat-panel air-cathode microbial fuel cell.

2.2. FA-MFC 운전

총 6개의 FA-MFC가 아질산화(조건_1), 아질산화 및 Anammox(조건_2), 활성슬러지(조건_3) 등 세 조건의 슬러지에 의해 식중되었다(Table 1). 아질산화와 Anammox 슬러지는 실험실 규모의 배양 반응기에서, 활성슬러지는 부산시 해운대하수처리장에서 각각 확보되었다. 질산화 전배양을 위한 단계 I에서의 배지 조성은 다음과 같다; (NH₄)₂SO₄ 0.236 g/L (50 mg-N/L), NaHCO₃ 0.12 g/L, KH₂PO₄ 0.07 g/L, CaCl₂ · 2H₂O 0.0175 g/L, MgSO₄ · 7H₂O 0.0125 g/L, FeSO₄ · 7H₂O 0.009 g/L, EDTA 0.006 g/L. 질산화와 탈질이 동시에 수행되는 단계 II에서는 기존 배지에 탄소원인 글루코스가 추가되었으며, COD 농도를 단계적으로(150, 300, 500, 750, 1,000 mg-COD/L) 증가시켰다. 단계 II에서 활성슬러지를 식중원으로 하며 질산화 전배양을 거치지 않은(조건_4) FA-MFC 2개가 추가되었고, 각 식중 조건의 2개 반응기 중 하나는 1,000 Ω의 외부저항을 연결한 닫힌회로 조건으로, 다른 하나는 외부저항이 연결되지 않은 열린회로 조건으로 운전되었다. 모든 실험은 상온(15-25℃)에서 회분식으로 수행되었다.

Table 1. Initial inoculum sources and treatment conditions

Treatment	Initial inoculum	Phase I (Pre-nitrification acclimation)		Phase II (Nitrification + Denitrification)	
		NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	COD (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	COD (mg/L)
Treatment 1	Nitritation sludge	50	0	50	150~1,000
Treatment 2	Nitritation/Anammox sludge mixture	50	0	50	150~1,000
Treatment 3	Activated sludge I	50	0	50	150~1,000
Treatment 4	Activated sludge II (w/o acclimation)	-	-	50	150~1,000

2.3. 분석 방법

회분식 운전기간 동안 주기적으로 시료를 채취하였고, 실린지 필터(0.22 μm)를 이용하여 여과를 거친 후에 각 성분을 분석하였다. 암모니아성 질소와 COD는 각각 분석용 키트(Humas Co. Ltd., Korea)를 이용하여 측정하였고, 아질산성 질소와 질산성 질소는 Ion Chromatography (DX-300, DIONEX, Sunnyvale, USA)를 이용하여 분석하였다.

전압(V)은 data-acquisition system (Model 7700, Keithley Instruments Inc., USA)을 이용하여 매 10분마다 측정하였다. 전류(I)는 식 (1)을 통하여 산출하였다. 여기서 R 은 외부저항이다.

$$V = I \times R \quad (1)$$

쿨롱효율(Coulombic efficiency, C_E)은 식 (2)를 이용하여 산출하였다.¹³⁾ 여기서 8은 COD 전환 상수이고, t 는 반응시간, F 는 Faraday 상수(96,500 C/mol e^-), v 는 반응기 부피, ΔCOD 는 분해된 COD 농도이다.

$$C_E = \frac{8 \int_0^t I dt}{Fv \Delta\text{COD}} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 질산화 전배양 단계

질산화 전배양을 위한 단계 I에서 모든 식중 조건들의 암모니아성 질소가 24시간 내에 99% 이상 질산성 질소로 산화되었다(Fig. 2). 조건_1은 암모니아 산화균(ammonium oxidizing bacteria, AOB)으로 우점화된 아질산화 슬러지를 식중하였음에도 불구하고, 모든 암모니아성 질소가 아질산성 질소 축적 없이 질산성 질소로 산화되었다. Anammox 슬러지가 추가된 조건_2는 아질산성 질소가 초기에 일부만(10 mg-N/L) 축적되었다. 일반적으로 아질산화 및 Anammox 반응은 온도(>30°C)와 용존산소(dissolved oxygen, DO) 농도(<1.0 mg/L)에 큰 영향을 받는다고 알려져 있다.^{14,15)} 본 연구의 조건_1과 조건_2에서 사용된 식중원들 또한 높은 온도(35°C)와 낮은 DO 농도(<0.5 mg/L)에서 배양되었다.¹⁶⁾ 따라서 FA-MFC의 상온(15-25°C) 운전과 외기환원전극으로부터의 산소 투과에 기인한 반응기 내부의 DO 농도 상승(>3.0 mg/L)이 아질산화 및 Anammox 반응을 억제하였고, 이로 인해 아질산 산화균(nitrite oxidizing bacteria, NOB)이 성장하여 완전 질산화가 일어난 것으로 사료된다.

활성슬러지를 식중한 조건_3은 다른 조건들과 유사하거나 조금 더 빠른 질산화 반응을 나타냈다. 12시간에서의 질산성 질소 생성속도는 조건_3 (83 $\pm$ 7 g-N/m³/d)이 조건_1 (77 $\pm$ 7 g-N/m³/d)과 조건_2 (79 $\pm$ 7 g-N/m³/d)보다 조금

Fig. 2. Concentrations of nitrogen compounds during the period of pre-nitrification acclimation at treatment_1 (a), treatment_2 (b), and treatment_3 (c).

더 높았다. 이는 활성슬러지 내의 AOB와 NOB가 FA-MFC에 성공적으로 식중되었음을 나타낸다. FA-MFC를 구성하는 두 개의 SEA는 외기환원전극과 분리막, 산화전극을 밀착시킨 형태이고, 넓은 전극 면적(300 cm² × 2)을 이용했기 때문에 산소의 자발적 투과가 원활하게 일어날 수 있었다. 따라서 FA-MFC의 구조를 이용한다면 질소제거에 관여하는 미생물을 선별적으로 우점화시키지 않더라도 완전한 질산화 반응을 유도할 수 있다고 판단된다.

3.2. 질산화 및 탈질 단계

FA-MFC는 질산화 전배양 단계의 유무에 관계없이 질산화 및 탈질 동시 반응이 가능하였다. 유입 유기물 농도 150 및 300 mg-COD/L에서의 유출 총질소 농도는 조건_1이 36.3 ± 0.7 및 25.1 ± 1.0 mg-N/L, 조건_2가 35.9 ± 2.6 및 27.7 ± 1.0 mg-N/L, 조건_3이 36.9 ± 1.7 및 21.5 ± 9.6 mg-N/L, 조건_4가 28.1 ± 0.6 및 19.0 ± 2.0 mg-N/L로 각각 나타났는데, 질산화 전배양 단계를 거치지 않은 조건_4에서 질소가 가장 많이 제거되었다(Fig. 3). 따라서 질산화 전배양이 없어도 질산화균과 탈질균이 FA-MFC 내에 자발적으로 성장할 수 있었으며, 이로 인해 질산화 및 탈질 동시 반응이 성공적으로 일어날 수 있었다. 이 또한 FA-MFC의 구조적인 영향으로 사료되는데, DO 농도와 질소화합물 및 유기물의 농도 구배에 따라 전극 표면의 특정 위치에 특정 기능을 가진 미생물이 성장한다는 것을 추측할 수 있다. 즉, 산소 유입이 많은 환원전극 근처에는 AOB와 NOB 등 질산화균이 성장했고, DO 농도가 상대적으로 낮은 산화전극 근처에는 탈질균이 성장했을 가능성이 높기 때문에, 향후 전극표면 생물막을 대상으로 미생물군집분석을 수행하여 이와 관련된 반응 메커니즘을 규명할 필요가 있다. Gao 등¹⁷⁾은 활성슬러지로 식종한 외기환원전극 MFC에서 NOB인 *Nitrospira* 유사종이 우점화 되었다고 보고하였다.

모든 식종 조건들의 총질소제거율이 유기물의 농도가 높

아짐에 따라 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 3). 이는 FA-MFC로의 산소 공급이 충분한 상태에서 유기물 농도에 의한 종속영양탈질반응의 제한이 총질소제거율에 율속 단계로 작용하는 것으로 판단된다. 본 연구결과와 유사하게, Yan과 Regan¹⁰⁾은 외기환원전극 MFC에서의 질소제거율이 전기 생산 여부와는 관계없이 COD/N비가 높을수록 증가한다고 보고하였다. 최종적으로 유기물 농도 1,000 mg-COD/L에서 모든 조건들이 유사한 분해 경향을 나타냈으며, 유출 총질소 농도는 조건_1이 7.5 ± 0.1 mg-N/L, 조건_2가 7.8 ± 0.1 mg-N/L, 조건_3이 8.8 ± 0.1 mg-N/L, 조건_4가 8.5 ± 0.6 mg-N/L로 나타났다(Fig. 4).

3.3. 유기물 제거 및 전기 발생량

모든 조건들이 95% 이상의 COD 제거율을 나타냈고, 유입 유기물 1,000 mg-COD/L에서는 >99%의 COD 제거율을 나타냈다(Fig. 5). 유기물은 식종 조건과 관계없이 6시간 내에 90% 이상 제거되었다. 질소화합물 분석에 따르면, 유기물이 대부분 소모되기 전인 6시간 내에는 암모니아성 질소와 총질소가 동일한 경향으로 감소하였지만, 6시간 이후부터는 질산성 질소가 축적되는 현상이 발견되었다(Fig. 4). 탈질에 필요한 이론적 유기물량인 2.86 kg-COD/kg-NO₃⁻-N를 고려하였을 때, 50 mg-N/L의 총질소를 제거하기 위해 필요한 유기물 농도는 143 mg-COD/L이다. 하지만 본 연구

Fig. 3. Final concentrations of TN and nitrogen species after 24 h incubation under various COD concentrations in treatment 1_(a), treatment_2 (b), treatment_3 (c), and treatment_4 (d).

Fig. 4. Concentrations of nitrogen species during the period of phase II (nitrification and denitrification) during the initial concentration of 1,000 mg-COD/L in treatment_1 (a), treatment_2 (b), treatment_3 (c), and treatment_4 (d).

Fig. 5. Variation of COD concentration during the period of phase II (nitrification and denitrification) under the initial concentration of 1,000 mg-COD/L.

에서는 유입 유기물 농도 1,000 mg-COD/L에서도 완전한 탈질이 되지 못했는데, 이는 다른 유기물 분해균 등이 FA-MFC 내에서 성장하여 종속영양탈질균과 경쟁하였기 때문으로 추측된다. 따라서 하수 수준의 유기물 농도범위 150-300 mg-COD/L에서 충분한 총질소제거율을 얻기 위해서는 HRT 등을 조정하여 산소 공급을 제한한 조건에서 안정적인 질산화 및 탈질 동시 반응을 유도해야 되며, 관련 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

FA-MFC의 질소 및 유기물 제거경향은 회로연결과는 무

관하였고, 전기 발생량은 모든 식중 조건에서 매우 낮게 나타났다. 조건_4의 전기 발생량이 71 mV로 가장 높았고, 26 mV의 조건_1과 21 mV의 조건_2, 10 mV의 조건_3 순으로 나타났다. 쿨롱효율도 조건_4가 0.22%로 가장 높았고, 조건_1이 0.11%, 조건_3이 0.08%, 조건_2가 0.03%를 나타냈는데, 이는 대부분의 유기물이 전기 생산과는 무관하게 분해되었음을 의미한다. MFC에서 전기 생산에 관여하는 미생물은 대부분 혐기성 조건에서 성장하기 때문에¹³⁾ 산소가 쉽게 투과되는 FA-MFC의 구조가 전기생산균의 성장을 억제한 것으로 사료된다. 또한 외기환원전극 MFC에서 일어날 수 있는 암모니아성 질소 제거 기작인 암모니아 휘발은 본 연구와는 무관한 것으로 추측된다. 암모니아 휘발은 MFC의 전기 생산 메커니즘에 따른 환원전극부 근처의 pH 상승으로 인하여 암모니아성 질소가 탈기되는 현상으로써, MFC의 전기 생산량이 높을수록 촉진된다고 알려져 있다.^{9,18)} 따라서 FA-MFC의 질소제거 메커니즘은 대부분 생물학적 질산화 탈질에 기인한 것으로 사료된다. 비록 FA-MFC의 전기 생산량은 매우 낮지만, 유기물과 질소를 동시에 제거할 수 있다는 장점이 있기 때문에, 하수처리비용을 획기적으로 절감할 수 있는 공정으로 발전할 수 있으리라 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 질산화와 탈질이 동시에 가능한 FA-MFC

를 이용하여 식중원의 종류 및 질산화 전배양의 유무에 따라 유기물과 총질소제거율, 전기 발생량 등을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) FA-MFC의 질산화 반응은 식중원에 무관하였고, 질소 제거에 관여하는 미생물을 선별적으로 우점화시키지 않더라도 완전한 질산화 반응을 유도해낼 수 있었다.

2) FA-MFC의 질산화 및 탈질 통시 반응을 위해서는 질산화 전배양이 필요하지 않았고, 300 mg-COD/L 이하의 낮은 유기물 농도에서는 전배양을 하지 않은 조건이 더 높은 총질소제거율을 나타냈다.

3) FA-MFC는 95% 이상의 COD 제거율을 나타냈지만, 모든 유기물이 종속영양탈질에 이용되지는 않았기 때문에, 향후 유기물과 질소의 최적 제거율을 달성시킬 수 있는 운전조건을 찾을 필요가 있다.

4) FA-MFC의 전기 발생량은 낮았지만, 유기물과 질소를 동시에 제거할 수 있다는 장점이 있기 때문에, 추가 연구를 수행하여 이를 더 발전시킨다면 획기적인 하수처리공법으로써 주목받을 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

KSEE

References

- Jung, S., "Practical implementation of microbial fuel cells for bioelectrochemical wastewater treatment," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **13**(2), 93~100(2013).
- Logan, B. and Rabaey, K., "Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies," *Sci.*, **337**(6095), 686~690(2012).
- Lefebvre, O., Uzabiaga, A., Chang, I. S., Kim, B. H. and Ng, H. Y., "Microbial fuel cells for energy self-sufficient domestic wastewater treatment - a review and discussion from energetic consideration," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **89**(2), 259~270(2011).
- Kim, H., Kim, B. and Yu, J., "Power generation response to readily biodegradable COD in single-chamber microbial fuel cells," *Bioresour. Technol.*, **186**, 136~140(2015).
- Zhang, F., Ge, Z., Grimaud, J., Hurst, J. and He, Z., "Long-term performance of liter-scale microbial fuel cells treating primary effluent installed in a municipal wastewater treatment facility," *Environ. Sci. Technol.*, **47**(9), 4941~4948(2013).
- Yu, J., Seon, J., Park, Y., Cho, S. and Lee, T., "Electricity generation and microbial community in a submerged-exchangeable microbial fuel cell system for low-strength domestic wastewater treatment," *Bioresour. Technol.*, **117**, 172~179(2012).
- Chun, J., Yu, J., Park, Y., Seon, J., Cho, S. and Lee, T., "Acceleration of biological denitrification by using bioelectrochemical reactor," *J. Environ. Sci.*, **21**(8), 989~996(2012).
- Yan, H., Saito, T. and Regan, J. M., "Nitrogen removal in a single-chamber microbial fuel cell with nitrifying biofilm enriched at the air cathode," *Water Res.*, **46**(7), 2215~2224(2012).
- Kim, J., Zuo, Y., Regan, J. M. and Logan, B. E., "Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating animal wastewater," *Biotechnol. Bioeng.*, **99**(5), 1120~1127(2008).
- Yan, H. and Regan, J. M., "Enhanced nitrogen removal in single-chamber microbial fuel cells with increased gas diffusion areas," *Biotechnol. Bioeng.*, **110**(3), 785~791(2013).
- Cheng, S., Liu, H. and Logan, B. E., "Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure," *Electrochem. Commun.*, **8**(3), 489~494(2006).
- Yu, J., Park, Y. and Lee, T., "Effect of separator and inoculum type on electricity generation and microbial community in single-chamber microbial fuel cells," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, **37**(4), 667~675(2014).
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R. A., Schrorder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. and Rabaey, K., "Microbial fuel cells: Methodology and technology," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), 5181~5192(2006).
- Dosta, J., Fernandez, I., Vazquez-Padin, J. R., Mosquera-Corral, A., Campos, J. L., Mata-Alvarez, J. and Mendez, R., "Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process," *J. Hazard. Mater.*, **154**(1-3), 688~693(2008).
- Jung, J., Kang, S., Chung, Y. and Ahn, D., "Factors affecting the activity of anammox bacteria during start up in the continuous culture reactor," *Water Sci. Technol.*, **55**(1), 459~468(2007).
- Jo, K., Park, Y., Cho, S. and Lee, T., "Variation of nitrogen removal efficiency and microbial communities depending on operating conditions of a CANON process," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(6), 332~339(2015).
- Gao, C., Wang, A., Wu, W. M., Yin, Y. and Zhao, Y. G., "Enrichment of anodic biofilm inoculated with anaerobic or aerobic sludge in single chambered air-cathode microbial fuel cells," *Bioresour. Technol.*, **167**, 124~132(2014).
- Min, B., Kim, J. R., Oh, S., Regan, J. M. and Logan, B. E., "Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells," *Water Res.*, **39**(20), 4961~4968(2005).