침지형 미생물연료전지에서 유입 COD 및 HRT 변화가 하수 수준의 질소 제거에 미치는 영향

Effect of COD and HRT Changes in Submerged Microbial Fuel Cells on Nitrogen Removal at the Level of Domestic Wastewater

박영현 · 양희천 · 유재철 · 이태호[†]

Younghyun Park · Heechun Yang · Jaechul Yu · Taeho Lee[†]

부산대학교 사회환경시스템공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

(Received July 6, 2018; Revised August 7, 2018; Accepted August 16, 2018)

Abstract : Submerged-type microbial fuel cells (MFCs) have been developed to cost-effectively treat organics in wastewater. However, evaluation of nitrogen removal in MFCs is still limited to apply MFCs for domestic wastewater treatment. This study developed submerged MFC system consisting of 4 units and evaluated COD and TN removal efficiencies and energy recovery according to substrate type and concentration and HRT. The organic removal efficiencies were 78% (500 mg-COD/L), 89% (150 mg-COD/L of acetate) and 76% (150 mg-COD/L of glucose) at the optimal HRT of 6 h. Submerged MFC system for removal of low-strength nitrogen (40 mg-N/L) could satisfy the TN discharge limit (<20 mg-N/L) and the nitrogen removal rates of 72-192 g-N/m³/d at the optimal HRTs of 3 h (acetate) and 8 h (glucose). Because additional energy for nitrogen removal is not required, despite low energy recoveries (<0.004 kW/kg-COD), it is expected that the submerged MFC system can be applied as the energy-neutral domestic wastewater treatment process.

Key Words : Submerged Microbial Fuel Cell, Nitrification And Denitrification, Hydraulic Retention Time, Energy-Neutral Domestic Wastewater Treatment

요약 : 침지형 미생물연료전지(MFC)는 하수처리공정에 쉽게 적용할 수 있는 구조이지만, 질소 제거에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 4개의 유닛으로 구성된 침지형 MFC 시스템을 이용하여 기질의 종류 및 농도와 HRT에 따른 COD 및 TN 제거율, 에너지 회수를 평가하였다. 유기물 제거를 위한 최적 HRT는 모든 기질 조건에서 6시간이었고, 아세트산 500 mg-COD/L는 78%, 150 mg-COD/L는 89%, 글루코스 150 mg-COD/L는 76%가 제거되었다. 하수 수준의 질소 농도(40 mg-N/L) 제거를 위한 최적 HRT는 아세트산은 3시간, 글루코스는 8시간이었고, 우리나라 하수처리시설의 TN 방류수 수질기준 (<20 mg-N/L)을 만족시켰으며, 이때의 질소 제거속도는 72-192 g-N/m³/d이었다. 침지형 MFC의 에너지 회수량은 모든 조건에서 0.004 kW/kg-COD 이하로 나타났지만, 질소 제거에 소비되는 추가 에너지가 없기 때문에, 향후 에너지 중립적인 하수처리공정으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 침지형 미생물연료전지, 질산화 및 탈질, 수리학적체류시간, 에너지 중립형 하수처리

1. 서론

미생물연료전지(microbial fuel cell, MFC)는 하수 내의 유기물을 분해하여 전기 에너지를 생산할 수 있고, 혐기성 기반의 공정이기 때문에 기존 활성슬러지 공법을 대체할 수 있는 에너지 절감형 기술로 주목받고 있다.^{1,2,3)} 특히 외기 환원전극(air-cathode)을 적용한 일실형(single-chamber) MFC는 공기 중의 산소를 직접적으로 전자수용체로 사용할 수 있기 때문에 폭기 에너지가 필요 없으며, 상온에서 운전 가능하다는 장점도 있다.^{4,5)} 최근에는 평판형,⁶⁾ 원통형,⁷⁾ 분리막 생물반응조와의 연계형⁸⁾ 등 다양한 구조의 외기환원전극 MFC를 이용하여 하수를 처리하는데 성공하였다. 하나의 큰 반응조에 여러 개의 단위 유닛(unit)을 삽입하는 구조의 침지형 MFC는 하수처리공정에 쉽게 적용할 수 있다고 알려져 있다.⁹⁾ 침지형 MFC를 이용하면 하수 농도 수준의 유

기물을 8시간 이내의 수리학적체류시간(hydraulic retention time, HRT)에서 처리할 수 있으며, 우리나라 하수처리시설의 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD) 방류수 수질기준 40 mg-COD/L 이하를 만족시킬 수 있다.⁹⁾ 한편 전극의 배열 방법도 MFC의 성능에 큰 영향을 준다고 알려져 있는데, 산화전극과 외기환원전극 간의 간격이 최소화된 샌드위치 타입의 SEA (separator electrode assembly) 구조가 최근 가장 많이 사용되고 있다.¹⁰⁾ SEA는 반응조 내부의 이온과 물질전달 경로를 최소화시킬 수 있기 때문에 하수의 낮은 기질 농도 및 전기전도도를 극복할 수 있다.

최근 영양염류에 대한 규제가 강화됨에 따라, MFC를 하수처리공정에 적용하기 위해서는 질소 제거와 관련된 연구도 반드시 수행될 필요가 있다. 하수 내의 총 질소(total nitrogen, TN) 중 대부분을 차지하는 암모니아성 질소를 제거하기 위해서 생물학적 질산화 및 탈질 반응이 가장 많이 사

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

용되고 있다. 질산화는 암모니아 산화균(ammonia oxidizing bacteria, AOB)에 의한 아질산화(nitritation) 반응과 아질산 산화균(nitrite oxidizing bacteria, NOB)에 의한 질산화(nitrification) 반응으로 구성된다. 탈질은 유기물 등을 전자공여체로 하는 종속영양 탈질균에 의해 질산성 질소가 아질산성 질소와 일산화 질소, 아산화 질소 등을 거쳐 최종적으로 질소 가스로 환원되는 반응이다. 이러한 생물학적 질산화 및 탈질 반응은 외기환원전극과 SEA 구조가 적용된 평판형 MFC에서도 활성슬러지 등 복합 미생물군집으로부터 자발적으로 유도될 수 있었다.¹¹⁾ 또한 실제 하수 조건에서도 TN을 성공적으로 제거하여 2.5시간 이내의 빠른 HRT에서 우리나라 방류수 수질기준인 20 mg-N/L 이하를 만족시켰고, 미생물군집분석을 통해 *Nitrosomonas* 등 AOB와 *Nitratireductor* 등 탈질균의 존재를 확인하였다.⁶⁾ 하지만 하수처리 공정 적용에 유리한 침지형 MFC는 전기 생산과 유기물 제거와 관련된 연구 위주로 수행되었고, 질소 제거에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 4개의 단위 유닛으로 구성된 침지형 MFC 시스템을 이용하여, 고농도 유기물(아세트산 500 mg-COD/L) 및 질소 농도(80 mg-N/L)를 주입하는 1단계, 하수 수준의 유기물(아세트산 150 mg-COD/L) 및 질소 농도(40 mg-N/L)를 주입하는 2단계, 복잡한 기질인 글루코스(150 mg-COD/L) 및 동일 질소 농도(40 mg-N/L)를 주입하는 3단계 운전을 통해 HRT에 따른 유기물 및 질소 제거율과 에너지 회수(energy recovery) 등을 분석하였다. 이를 통하여 침지형 MFC의 하수처리공정 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 침지형 MFC 구조

본 연구에서 사용된 침지형 MFC 유닛은 공기가 통하는 환원전극부(cathode compartment)를 사이에 두고, 두 개의 SEA가 서로 마주 보도록 제작되었다(Fig. 1(a)). 이는 기존에 보고되었던 평판형 외기환원전극 MFC의 역구조이다.¹¹⁾ SEA는 산화전극과 분리막(separator), 외기환원전극(air-cathode) 순으로 배열되었고, 폴리카보네이트(poly carbonate)로 제작된 커버(cover)와 환원전극부 사이에 위치하였으며, 누수 방지를 위하여 가스켓(gasket)이 삽입되었다. 단일 SEA의 유효 면적은 300 cm² (15 cm × 20 cm)이었다. 산화전극은 흑연펠트(graphite felt), 분리막은 폴리프로필렌(polypropylene) 재질의 부직포(Korea Non-Woven Tech. Co, Ltd., Korea),⁵⁾ 환원전극은 탄소천(carbon cloth, E-Tek, BASF Fuel Cell, Inc., USA)이 각각 사용되었다. 공기환원전극을 제조하기 위하여, 탄소천의 한 면에는 PTFE (polytetrafluoroethylene) 용액을 이용한 방수 처리를 하였고, 다른 면에는 Pt/C를 이용한 촉매 처리를 하였다.^{12,13)} 각 MFC 유닛의 두 SEA는 티타늄 도선에 의해 병렬로 연결되었고, 1000 Ω의 외부저항을 연결하였다.

Fig. 1. Schematic diagram of a submerged microbial fuel cell unit (a) and system (b).

침지형 MFC 시스템은 총 4개의 유닛으로 구성되었으며, 유입수가 모든 유닛의 산화전극을 경유하여 흐르도록 반응조 내부에 칸막이를 설치하였다(Fig. 1(b)). 반응조의 유효 부피는 각 유닛별로 3.6 L이었다.

2.2. 침지형 MFC 운전

침지형 MFC 시스템은 기질 농도 및 종류 등에 따라 3단계로 운전되었다(Table 1). 초기 순응단계에서는 반응조를 식종하고 HRT 16시간으로 배지를 주입하였다. 식종원은 부산시 수영하수처리장에서 확보된 활성슬러지가 사용되었다. 배지 조성은 다음과 같았다; C₂H₃O₂Na 0.64 g/L, NH₄Cl 0.3 g/L, K₂HPO₄ 3.4 g/L, KH₂PO₄ 1.7 g/L, NaCl 0.4 g/L, KCl 0.2 g/L, MgSO₄ · 7H₂O 0.1 g/L, 효모추출액 0.05 g/L. 운전 1단계에서는 아세트산 500 mg-COD/L 및 TN 80 mg-N/L 조건에서 HRT (1.5시간, 3시간, 6시간)의 영향을 평가하였다. 운전 2단계에서는 우리나라 하수 수준의 COD 및 TN 농

Table 1. Operating conditions of submerged microbial fuel cell system

	Substrate	COD (mg/L)	TN (mg/L)	HRT (h)
Phase 1	Acetate	500	80	1.5, 3, 6
Phase 2	Acetate	150	40	1.5, 3, 6
Phase 3	Glucose	150	40	3, 6, 8

도인 아세트산 150 mg-COD/L 및 40 mg-N/L 조건에서 HRT (1.5시간, 3시간, 6시간)의 영향을 평가하였고, 운전 3단계에서는 상대적으로 복잡한 유기물인 글루코스 150 mg-COD/L와 TN 40 mg-N/L 조건에서 HRT (3시간, 6시간, 8시간)의 영향을 평가하였다. 모든 실험은 상온($20 \pm 2^\circ\text{C}$)에서 수행되었다.

2.3. 분석 방법

침지형 MFC 시스템의 운전 기간 동안 수질 분석과 전기 화학적 분석이 수행되었다. COD와 TN, 암모니아성 질소는 각각 수질공정오염시험법에 근거한 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 , V)은 data-acquisition system (Model 7700, Keithley Instruments Inc., USA)을 이용하여 측정하였고, 전류(I , A)와 전력(P , W)은 식 (1)과 식 (2)을 통해 각각 산출되었다.

$$I = \frac{V}{R_{ext}} \quad (1)$$

$$P = I \times V \quad (2)$$

여기서 R_{ext} (Ω)은 외부저항이다. 유기물 제거에 따른 에너지 회수(E_C , kWh/kg-COD)는 식 (3)을 통해 산출되었다.¹⁴⁾

$$E_C = \frac{P}{Q \times \Delta COD} \quad (3)$$

여기서 Q (L/h)는 유량이고, ΔCOD (g/L)는 분해된 COD 농도이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 및 질소 동시 제거가 가능한 침지형 MFC 구축

아세트산 농도 500 mg-COD/L에서 HRT에 따른 유기물 제거율은 78% (6시간), 76% (3시간), 54% (1.5시간)이었고, 질소 제거율은 51% (6시간), 58% (3시간), 14% (1.5시간)이었다(Fig. 2). HRT 3시간과 6시간 조건은 유기물과 질소 제거 경향이 서로 유사하였지만, 가장 빠른 HRT 1.5시간 조건은 유기물과 질소 제거율이 모두 낮았다. 모든 조건에서 아질산성 질소와 질산성 질소는 검출되지 않았고, 암모니아성 질소와 TN 농도가 거의 일치하였다. 따라서 침지형 MFC에서의 질소 제거 기작은 일반적인 외기환원전극 MFC에서 일어날 수 있는 (1) 생물학적 질산화 및 탈질 동시 반응 또는 (2) 화학적 암모니아 휘발(ammonia volatilization)에 기인한 것으로 추측된다.¹¹⁾ 기작 (1)은 외기환원전극으

Fig. 2. COD (a) and TN concentrations (b) in the submerged microbial fuel cell system during phase 1.

로부터 자발적으로 투과된 산소를 이용하는 질산화균이 수중의 암모니아성 질소를 질산성 질소로 산화시키고, 이를 유기물을 전자공여체로 한 탈질균이 곧바로 질소 가스로 전환시키는 반응이다. 특히 상대적으로 높은 질소 농도가 주입되는 첫 번째 유닛에서 가장 활발한 반응이 일어날 수 있다(Fig. 2(b)). 이와 유사하게, 여러 반응기로 구성된 평판형 외기환원전극 MFC에서도 전단부에서 질산화 및 탈질 동시 반응이 활발하게 일어났으며, 관련 미생물군집도 발견되었다.⁶⁾ 기작 (2)는 MFC의 전기 생산 기작에 따라 외기환원전극 인근의 pH가 상승하여 수중의 암모니아성 질소가 탈기되는 반응이다. 이전 연구에 따르면, 화학적 암모니아 휘발에 대한 질소 제거 영향을 평가하기 위하여, 전극 면적 7 cm^2 인 외기환원전극 MFC에 1.1 V의 전압을 주입하자 4일 만에 40%의 암모니아가 제거되었다고 한다.¹⁵⁾ 또한 본 연구와 동일한 재료와 면적(600 cm^2)의 SEA를 사용한 평판형 외기환원전극 MFC에 1.1 V의 전압을 주입하였을 때는 4일 만에 51%의 암모니아가 제거되었지만, 초기 1일 동안에는 암모니아가 제거되지 않았다.⁶⁾ 따라서 HRT가 낮고(<6 시간) 전압 발생량도 낮음($<0.4\text{ V}$) 침지형 MFC에서는 화학적 암모니아 휘발에 의한 질소 제거 영향이 상대적으로 작다고 추측되며, 후속 연구를 통해 이를 입증할 필요가 있다.

3.2. 하수 농도 수준의 유기물 및 질소 동시 제거

하수 수준인 아세트산 농도 150 mg-COD/L 및 TN 농도 40 mg-N/L에서 HRT에 따른 유기물 제거율은 89% (6시간), 72% (3시간), 69% (1.5시간)이었고, 질소 제거율은 58% (6시간), 59% (3시간), 18% (1.5시간)이었다(Fig. 3). 가장 빠른 HRT 1.5시간 조건은 HRT 3시간과 유사한 유기물 제거 경향을 보였지만, 질소 제거 반응은 잘 일어나지 않았다. 따라서 침지형 MFC로 하수 수준의 농도를 처리하기 위해서는 3시간 이상의 HRT를 사용할 필요가 있다.

아세트산보다 복잡한 유기물인 글루코스를 기질로 이용한 조건에서는 HRT에 따른 유기물 제거율이 77% (8시간), 76% (6시간), 69% (3시간)이었고, 질소 제거율은 57% (8시간), 49% (6시간), 40% (3시간)이었다(Fig. 4). 아세트산 기질과는 달리 첫 번째 유닛의 유기물 제거율이 더 높았으며, 이로 인해 각 유닛에 따른 유기물 제거 경향이 로그형에 가까웠다(HRT 8시간의 $R^2 = 0.998$, 6시간의 $R^2 = 0.982$, 3시간의 $R^2 = 0.999$). 질소 제거율은 동일 HRT 대비 아세트산 조건보다 10-18% 낮게 나타났다. 이는 호기성 종속영양균과 질산화균이 유입수에 포함되어 있거나 외기환원전극을 통해 반응조 내부로 전달된 미량의 산소를 두고 서로 경쟁하였기 때문으로 추측된다. 1 g-N의 질산성 질소를 탈질하

Fig. 3. COD (a) and TN concentrations (b) in the submerged microbial fuel cell system during phase 2.

Fig. 4. COD (a) and TN concentrations (b) in the submerged microbial fuel cell system during phase 3.

기 위해서는 이론적으로 유기물 2.86 g-COD가 요구되므로, 40-50 mg-N/L의 TN을 제거하기 위해서는 유기물 114-143 mg-COD/L가 요구된다. 본 연구에서는 30 mg-N/L 이하의 질소가 제거되었기 때문에, 생물학적 질산화 및 탈질 반응이 침지형 MFC의 유일한 질소 제거 기작이라 가정한다면, 약 85 mg-COD/L 이하의 유기물이 질소 제거에 이용된 것으로 추측된다.

본 연구에서 사용된 침지형 MFC는 질소 제거에 유리한 구조라고 판단되는데, 그 이유는 이전에 보고된 침지형 MFC는 HRT 8시간 조건에서 유기물 제거율이 90% 이상으로 높았지만 질소는 제거되지 않았기 때문이다.⁹⁾ 본 연구에서 침지형 MFC의 질소 제거속도가 72-192 g-N/m³/d로 나타났는데, 이는 전통적인 질산화 탈질공정의 21-58 g-N/m³/d보다 우수했다.¹⁶⁾ 또한 아세트산 조건에서는 HRT 3시간, 글루코스 조건에서는 HRT 8시간에서 우리나라 하수처리시설의 TN 방류수 수질기준(<20 mg-N/L)을 만족시켰다.

3.3. 에너지 회수

침지형 MFC의 E_c 는 유입 유기물 농도에 따라 서로 다른 경향을 나타냈다. 상대적으로 고농도(500 mg-COD/L)가 투입된 조건에서는 다른 유닛에도 에너지 회수가 가능했던 반

Fig. 5. Energy recoveries of submerged microbial fuel cell system during the whole period.

면, 저농도(150 mg-COD/L)가 주입된 조건에서는 대부분 첫 번째 유닛에서만 에너지 회수가 가능했다(Fig. 5). 본 실험에서 사용한 침지형 MFC의 구조에서는 100 mg-COD/L 이하의 유기물 농도에서는 전기 생산이 어려운 것으로 나타났다. 이는 충분한 양의 전기활성균(electrochemically active bacteria)이 전극표면에 성장하지 못했기 때문일 수 있다. 또는 전기활성균 이외의 종속영양균들이 생물막 표면에 과다 성장하여 전기활성균까지 도달해야 할 유기물의 물질전달을 방해했기 때문일 수도 있다. 이와 유사하게, 하수 수준의 유기물을 이용하는 외기환원전극 MFC에서 용존 유기물 농도가 100 mg-COD/L 이하일 때 전기 생산량이 급격하게 감소하였다고 보고되었다.¹⁷⁾ 또한 운전 기간 내내 높은 외부저항(1000 Ω)을 사용하였기 때문에 전류의 발생량이 제한

될 수밖에 없었으며, 이에 따라 E_c 가 0.004 kW/kg-COD 이하로 낮게 나타났다. 하수로부터 전기를 생산하는 것을 목적으로 하는 MFC는 평균적으로 0.17 kWh/kg-COD의 에너지를 회수한다고 보고되었다.¹⁴⁾ 따라서 생물전기화학적 질소 제거 경향을 분석하기 위해서는, 낮은 외부저항을 사용하여 전류 생산량을 증가시키고 이에 따른 에너지 회수 및 질소 제거율을 평가하는 연구를 수행할 필요가 있다.

본 연구의 침지형 MFC는 기존 상용화된 공법들과 비교하여 질소 제거에 소모되는 에너지 비용이 낮을 것으로 판단된다. 질산화에 필요한 폭기 에너지를 기준으로 하였을 때, 완전 질산화 및 탈질 공정은 4.6 kWh/kg-N,¹⁶⁾ 부분 질산화 및 탈질 공정은 1.6 kWh/kg-N,¹⁶⁾ 부분 아질산화 및 아나모क्स 공정은 1.0 kWh/kg-N이 필요한 반면,¹⁸⁾ 침지형 MFC의 에너지 요구량은 없었다(Fig. 6). 또한 종속영양 탈질을 위한 외부 탄소원 주입도 불필요하며, 생물전기화학적 질소제거 기작의 추가에 따른 성능 향상도 기대할 수 있다. 따라서 침지형 MFC가 향후 에너지 중립적인 하수처리공정으로 발전할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 총 4개의 유닛으로 구성된 연속흐름식 침지형 MFC 시스템을 이용하여 기질의 종류 및 농도와 HRT에 따라 COD 및 TN 제거율, 에너지 회수 등을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유기물 제거를 고려한 최적 HRT 조건은 6시간이며, 아세트산 500 mg-COD/L의 제거율은 78%, 아세트산 150 mg-COD/L의 제거율은 89%, 글루코스 150 mg-COD/L의 제거율은 76%를 나타냈다.
- 2) 하수 수준의 농도 조건에서 침지형 MFC의 질소 제거 속도가 72-192 g-N/m³/d로 나타났으며, 아세트산 기질 기준 HRT 3시간, 글루코스 기질 기준 HRT 8시간에서 20 mg/L (우리나라 하수처리시설 TN 방류수 수질기준) 이하의 유출수 농도를 얻을 수 있었다. 보다 상세한 연구가 필요하지만 질소 제거는 주로 생물학적 질산화 및 탈질 동시 반응에 의해 일어나는 것으로 판단된다.
- 3) 침지형 MFC의 에너지 회수량은 0.004 kW/kg-COD 이하로 낮았지만 질소 제거에 소비되는 폭기 에너지가 없기 때문에, 향후 에너지 중립적인 하수처리공정에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgement

이 논문은 2016년도 부산녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 연구되었음(16-3-10-14).

KSEE

Fig. 6. Comparison of energy consumption for nitrogen removal between submerged microbial fuel cell system and conventional processes.

References

1. Jung, S., "Practical implementation of microbial fuel cells for bioelectrochemical wastewater treatment," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **13**(2), 93~100(2013).
2. Kim, I. S., Chae, K. J., Choi, M. J. and Verstraete, W., "Microbial fuel cells: recent advances, bacterial communities and application beyond electricity generation," *Environ. Eng. Res.*, **13**(2), 51~65(2008).
3. Logan, B. and Rabaey, K., "Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies," *Sci.*, **337**(6095), 686~690(2012).
4. Liu, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B. E., "Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell," *Environ. Sci. Technol.*, **38**(7), 2281~2285(2004).
5. Yu, J., Lee, C., Kim, S., Cho, H., Cho, S. and Lee, T., "Electricity generation and microbial community structure variation depending on separator types and cathode characteristics in air-cathode MFC," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(2), 113~120(2010).
6. Park, Y., Park, S., Nguyen, V. K., Yu, J., Torres, C. I., Rittmann, B. E. and Lee, T., "Complete nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in flat-panel air-cathode microbial fuel cells treating domestic wastewater," *Chem. Eng. J.*, **316**, 673~679(2017).
7. Tremouli, A., Martinos, M., Bebelis, S. and Lyberatos, G., "Performance assessment of a four-air cathode single-chamber microbial fuel cell under conditions of synthetic and municipal wastewater treatments," *J. Appl. Electrochem.*, **46**(4), 515~525(2016).
8. Kim, K. Y., Yang, W., Ye, Y., LaBarge, N. and Logan, B. E., "Performance of anaerobic fluidized membrane bioreactors using effluents of microbial fuel cells treating domestic wastewater," *Bioresour. Technol.*, **208**, 58~63(2016).
9. 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).
10. Ahn, Y. and Logan, B. E., "A multi-electrode continuous flow microbial fuel cell with separator electrode assembly design," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **93**(5), 2241~2248(2012).
11. Park, Y., Yu, J., Nguyen, T. H. and Lee, T., "Nitrogen removal in flat-panel air-cathode microbial fuel cell according to various inoculum sources and organic concentration," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(12), 635~640(2016).
12. 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).
13. Nam, T., Son, S., Kim, E., Tran, H. V. H., Koo, B., Chai, H., Kim, J., Pandit, S., Gurung, A., Oh, S. E., Kim, E. J., Choi, Y. and Jung, S. P., "Improved structures of stainless steel current collector increase power generation of microbial fuel cells by decreasing cathodic charge transfer impedance," *Environ. Eng. Res.*, **23**(4), 383~389(2018).
14. Ge, Z., Li, J., Xiao, L., Tong, Y. and He, Z., "Recovery of electrical energy in microbial fuel cells," *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **1**(2), 137~141(2014).
15. 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).
16. Aymerich, I., Rieger, L., Sobhani, R., Rosso, D. and Corominas, L., "The difference between energy consumption and energy cost: modelling energy tariff structures for water resource recovery facilities," *Water Res.*, **81**, 113~123(2015).
17. Zhang, X., He, W., Ren, L., Stager, J., Evans, P. J. and Logan, B. E., "COD removal characteristics in air-cathode microbial fuel cells," *Bioresour. Technol.*, **176**, 23~31(2015).
18. Suneethi, S. and Joseph, K., "ANAMMOX process start up and stabilization with an anaerobic seed in Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR)," *Bioresour. Technol.*, **102**(19), 8860~8867(2011).