

환원전극 DO 농도에 따른 단일 및 직렬연결 미생물연료전지 전기발생량 평가

유재철 · 이태호[†]

부산대학교 사회환경시스템공학부

(2008년 10월 14일 접수, 2009년 4월 20일 채택)

Evaluation of Single and Stacked MFC Performances under Different Dissolved Oxygen Concentrations in Cathode Chamber

Jae Cheul Yu · Tae Ho Lee[†]

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT : The performance of microbial fuel cell (MFC) can be affected by many factors including the rate of organic matter oxidation, the electron transfer to electrode by electrochemical bacteria, proton diffusion, the concentration of electron acceptor, the rate of electron acceptor reduction and internal resistance. the performance of MFC using oxygen as electron acceptor can be influenced by oxygen concentration as limit factors in cathode compartment. Many studies have been performed to enhance electricity production from MFC. The series or parallel stacked MFC connected several MFC units can use to increase voltages and currents produced from MFCs. In this study, a single MFC (S-MFC) and a stacked MFC (ST-MFC) using acetate as electron donor and oxygen as electron acceptor were used to investigate the influence of dissolved oxygen (DO) concentrations in cathode compartment on MFC performance. The power density (W/m^3) of S-MFC was in order $DO\ 5 > 3 > 7 > 9\ mg/L$, the maximum power density (W/m^3) of S-MFC was $42\ W/m^3$ at $DO\ 5\ mg/L$. The power density (W/m^3) of ST-MFC was in order $DO\ 5 > 7 > 9 > 3\ mg/L$ and the maximum power density (W/m^3) of ST-MFC was $20\ W/m^3$ at $DO\ 5\ mg/L$. These results suggest that the DO concentration of cathode chamber should be considered as important limit factor of MFC operation and design for stacked MFC as well as single MFC. The results of ST-MFC operation showed the voltage decrease of some MFC units by salt formation on the surface of anode, resulting in decrease total voltage of ST-MFC. Therefore, connecting MFC units in parallel might be more appropriate way than series connections to enhance power production of stacked MFC.

Key Words : Microbial Fuel Cell, Oxygen Single MFC, Stacked MFC

요약 : 미생물연료전지(Microbial fuel cell, MFC)의 효율은 산화전극부내의 유기물 산화율, 전기활성박테리아에 의한 전자 전달, 수소이온 전달, 환원전극내의 전자수용체의 농도 및 환원을, 내부저항 등 다양한 요소에 영향을 받는다. 특히 산소를 전자수용체로 이용하는 MFC의 경우, 환원전극내 산소농도는 MFC의 제한요소로 작용한다고 알려져 있다. 한편 MFC의 전기발생량을 높이기 위하여 여러 개의 MFC를 직렬 또는 병렬로 연결하여 전기발생량을 높이는 다양한 방법들이 연구되고 있다. 본 연구에서는 acetate를 산화전극부의 기질로 이용하고 산소를 환원전극의 전자수용체로 이용하는 단일 MFC와 직렬연결 MFC에서 환원전극의 용존산소 농도의 변화가 MFC 효율에 미치는 영향을 평가하였다. 단일 MFC의 전력밀도값(W/m^3)은 $DO\ 5 > 3 > 7 > 9\ mg/L$ 으로 나타났으며, 최대전력밀도값은 $42\ W/m^3$ 으로 나타났다. 직렬연결 MFC의 전력밀도값은 $DO\ 5 > 7 > 9 > 3\ mg/L$ 으로 나타났으며, 최대전력밀도값은 $20\ W/m^3$ 이었다. 이러한 결과로부터 환원전극의 DO 농도는 MFC 설계 및 운전시에 중요한 제어인자로 고려해야 될 것으로 판단되었다. 또한 본 연구에서는 직렬연결 MFC의 운전 시, 일부 MFC에서 염의 축적으로 인한 전위역전 현상이 발생하여 전체 전기발생량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 전기생산량을 높이기 위하여 MFC를 직렬로 연결하는 것보다 병렬로 연결하는 것이 보다 타당한 것으로 사료되었다.

주제어 : 미생물연료전지, 산소, 단일 MFC, 직렬연결 MFC

1. 서론

세계적으로 고유가 시대를 대비하여 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 기술개발과 보급에 관심과 투자가 늘어나고 있다. 신재생에너지 기술에 대한 연구 가운데에서도 최근에는 축산폐수, 식품폐수, 하수, 슬러지에 포함되어 있는 유기물을 자원으로 활용하여 전기, 가스 등을 생산

하는 재생에너지 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell; MFC)는 전기활성 미생물을 촉매로 이용하여 하·폐수에 포함된 유기물의 화학적 에너지를 전기에너지로 전환할 수 있는 새로운 개념의 하·폐수 처리기술 및 대체에너지기술로서 주목받고 있다.^{1,2)}

MFC는 크게 산화전극부와 환원전극으로 나누어지며, 두 개의 전극부 사이에는 이온교환막이 놓여있다. 혐기성 조건의 산화전극에서는 전기활성미생물들에 의해서 glucose, acetate와 같은 유기물들이 산화되며, 전자와 수소이온이

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

Fax: 051-514-9574

발생하게 된다. 산화전극부에서 발생한 전자는 외부도선을 따라 환원전극으로 이동하게 되며, 수소이온은 이온교환막을 통과해서 환원전극으로 이동한다. 환원전극으로 이동한 전자와 수소이온은 전자수용체로서 공급된 물질(일반적으로 산소)에 전달되어 환원반응을 일으키게 된다. 이러한 일련의 반응을 통하여 산화전극부에서 환원전극으로 이동하는 연속적인 전자의 흐름이 전기에너지를 생성하게 된다.^{3,4)}

하지만 MFC의 실제 전기생성량은 이론적 생성량보다 낮다. 예를 들면, 산화전극부의 기질로서 acetate를 이용하고 환원전극의 전자수용체로서 산소를 이용한 MFC에서 이론적 전기발생량은 약 1.1 V이지만 실제 전기발생량은 최대 0.8 V인 것으로 보고되고 있다.⁶⁾ 그 이유는 MFC의 효율이 산화전극부내의 유기물 산화율, 전기활성박테리아에 의한 전자 전달, 수소이온 전달, 환원전극내의 전자수용체(산소)의 농도 및 환원율, 내부저항 등 다양한 요소에 영향을 받기 때문이다.

특히 산소는 대기 중에 풍부하게 존재하고 산화환원전위가 높아 MFC의 최종 전자수용체로 가장 많이 이용되고 있지만, 환원속도가 느리기 때문에 환원전극에 충분한 산소가 존재하지 않을 경우에는 환원전극에서 전자의 소모가 제한될 수 있다. 한편 환원전극에 과다하게 공급된 산소는 이온교환막을 통과하여 산화전극부로 이동함으로써 산화전극부의 반응을 저해할 수 있다. 따라서 산소를 전자수용체로 이용하는 MFC의 경우 환원전극 내 용존산소(DO) 농도는 MFC 운전의 중요한 인자로 작용한다.⁵⁾

전기발생량을 높이기 위한 간편한 방법 중의 하나는 여러 개의 MFC를 직렬 또는 병렬로 연결하는 방법이다. 하지만 MFC는 미생물을 이용하는 공정이기 때문에 외부조건에 많은 영향을 받을 수 있으며, 이는 전기발생량에 영향을 미칠 수 있다. 게다가 연결되어 있는 MFC 중에서 하나의 MFC가 잘못 운전되어도 전체 운전에 영향을 미칠 수 있다는 문제점이 있다. Aelterman 등⁶⁾은 hexacyanoferrate를 전자수용체로 사용하고 과립형 탄소를 전극으로 사용한 직렬연결 MFC를 운전한 결과, 높은 전류에서 전위가 역전되는 현상이 발생함을 보고하였다. 그 원인으로 높은 전류에서 일부 미생물의 기질전환활성이 저하함으로써 각 cell에서 생성되는 전위에 차이가 발생하고, 이에 따른 전위역전현상에 의해 전체적인 전압의 발생량이 감소한다고 추측하였다. 그러나 Oh 등⁷⁾은 살균한 공기환원전극 MFC를 직렬로 연결하여 glucose를 기질로 공급한 회분식 실험에서도 전위역전현상이 발생하는 것을 발견함으로써 미생물이 존재하지 않는 조건에서도 전위역전이 발생 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 용존산소를 전자수용체로 이용하는 직렬연결 MFC에 기질로서 acetate를 연속공급하며 용존산소 농도에 따른 전기생성량의 변화를 단일 MFC의 결과와 비교하였다. 또한 기존의 보고와는 달리 직렬연결 MFC의 산화전극부 표면에 염이 축적됨으로써 전위역전이 발생하

고 이로 인하여 직렬연결 MFC의 효율이 감소하는 현상을 확인하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 미생물 연료전지

본 연구에서는 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 각 전극부의 유효면적이 18 mL (3 cm × 6 cm × 1 cm)인 사각형의 MFC를 사용하였다. 직렬연결 MFC는 단일 MFC 6개를 Fig. 1(b)처럼 직렬로 연결하여 사용하였다. 산화전극과 환원전극의 재질로는 Graphite felt를 사용하였으며, 각 전극은 Pt wire를 이용하여 외부에서 연결할 수 있도록 하였다. 산화전극과 환원전극 사이에는 수소이온교환막(Nafion 117, dupont Co., USA)을 설치하였다.

산화전극부에는 부산시 수영하수처리장의 호기조 반송슬러지를 식중하여, 전자공여체인 acetate (COD 600 mg/L)를 포함하는 배지를 공급하였으며, 환원전극에는 폭기한 수돗물을 공급함으로써 용존산소가 전자수용체로 이용될 수 있도록 하였다. 배지의 조성은 K₂HPO₄ 3.4 g/L, NH₄Cl 0.2 g/L, NaCl 0.5 g/L, MgSO₄ · 7H₂O 0.2 g/L, KH₂PO₄ 4.4 g/L, CaCl₂ · H₂O 0.0 g/L, CH₃COONa 1 g/L, trace elements

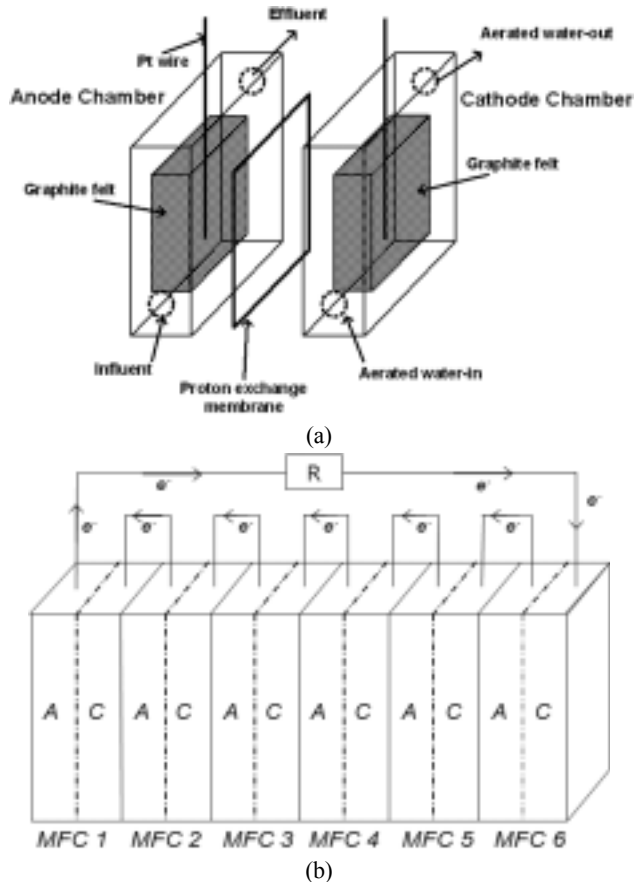


Fig. 1. Schematic diagram of a single (a) and a stacked MFC (b) connecting of six individual MFC units in series; R, external resistance; A, anode; C, cathode.

1 ml/L이었다. 산화전극부와 환원전극의 HRT (Hydraulic retention time)는 각각 2.5시간과 4.5분이었으며, 외부저항은 200 Ω, 운전온도는 25℃이었다.

2.2. DO변화에 따른 운전조건

초기 MFC 운전의 start up을 위하여 환원전극에는 DO 농도 9 mg/L인 수돗물을 유입유량 4 mL/min로 공급하였다. MFC의 전기발생량이 안정적으로 되었을 때, DO 농도 변화가 MFC의 효율에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 폭기량 수돗물의 유입유량을 4 mL/min으로 유지한 상태에서 폭기량을 조절하여 수돗물의 DO 농도를 9 mg/L에서 7, 5, 3 mg/L 순으로 변화시켰다. 그리고 각 DO 조건에서 저항(10~5,000 Ω)을 달리하며 전력발생량(전위 및 전력밀도)의 변화를 측정하여 작성한 그래프로부터 최대 전압 및 전류를 측정하였다. 전력밀도와 쿨롱효율은 각각 식 (1) 및 (2)을 이용하여 구하였다.²⁾

$$P = \frac{V \cdot I}{Va} \tag{1}$$

- P : 전력밀도(W/m³)
- V : 전압(v)
- I : 전류(a)
- Va : 산화전극부 부피(m³)

$$CE = \frac{M \cdot I}{F \cdot q \cdot b \cdot \Delta COD} \times 100 \tag{2}$$

- CE : coulombic efficiency(%)
- F : Faraday's 상수(96,485 C/mol · 전자수)
- q : 유량(L/s)
- b : 전자수(mol · 전자수)
- ΔCOD : COD 제거량(mg/L)
- M : 분자량(mg)
- I : 전류(a)

2.3. 분석방법

MFC에서 발생하는 전압의 변화는 Data acquisition system (Model 7700, Keithley Instruments Inc., USA)을 이용하여 측정하였다. 산화전극부 유출수의 SCOD_{Cr} 농도는 AA3 (Bran+Luebbe-Auto Analyzer 3, SPX Corporation, Germany)을 이용하여 측정하였으며, 환원전극에 유입되는 유입수의 DO농도는 DO meter (YSI 550A, YSI Incorporated, USA)를 이용하여 08시부터 8시간 단위로 3회/일 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고정저항에서 DO 농도변화에 따른 전기발생량 비교

운전시작 후 50시간이 경과하면서 단일 및 직렬연결 MFC에서 전기발생이 확인되었으며, 이후 전기발생량은 급격하게 증가하였다. 약 400시간 경과 후에는 단일 MFC의 경우 약 300 mV, 직렬연결 MFC의 경우 약 400 mV의 안정적인 전기발생량을 나타내었다.

환원전극내 DO 농도가 MFC 효율에 미치는 영향을 평가하기 위하여 환원전극의 유입수 DO농도를 9, 7, 5, 3 mg/L으로 감소시켜 단일 및 직렬연결 MFC의 전기발생량을 측정하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 단일 MFC의 경우, DO농도가 9 mg/L에서 3 mg/L로 감소함에 따라 전기발생량이 약 320 mV에서 360 mV으로 약 40 mV 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 직렬연결 MFC에서도 DO 농도가 9 mg/L에서 5 mg/L로 감소함에 따라 전기발생량은 약 420 mV에서 470 mV로 약 50 mV 정도 증가하였다. 이는 높은 DO 조건에서, 환원전극내 산소가 산화전극부로 확산되어, 산화전극부내 전기활성미생물의 전자수용체로 사용됨에 따라, 전기활성미생물에 의하여 전극으로 전달되는 전자의 양이 줄어들게 됨으로써 전기발생량이 감소한 것으로 사료된다. Chae 등⁸⁾은 산소를 전자수용체로 이용한 MFC에서 산소가 수소이온교환막을 통과하여 산화전극부로 이동한다고 보고하였으며, Gil 등⁹⁾은 환원전극의 산소 농도가 6 mg/L 보다 높은 경우에는 산화전극부로 확산되는 산소량이 증가하게 되고 산소가 전기활성미생물의 전자수용체로 사용되기 때문에 전기발생량이 감소하며, 6 mg/L 보다 낮은 경우에는 환원반응에 이용될 수 있는 산소농도가 부족하기 때문에 전기발생량이 감소한다고 보고하였다. 또한 Pham 등¹⁰⁾은 산소를 전자수용체로 이용하는 MFC에서 환원전극으로 별도의 촉매처리를 하지 않은 graphite felt를 사용할 경우 임계 DO 농도는 약 6 mg/L이라고 보고하였다.

그러나 직렬연결 MFC에서 DO 농도를 3 mg/L까지 감소시켰을 때, 전기발생량은 약 300 mV로 약 100 mV 정도

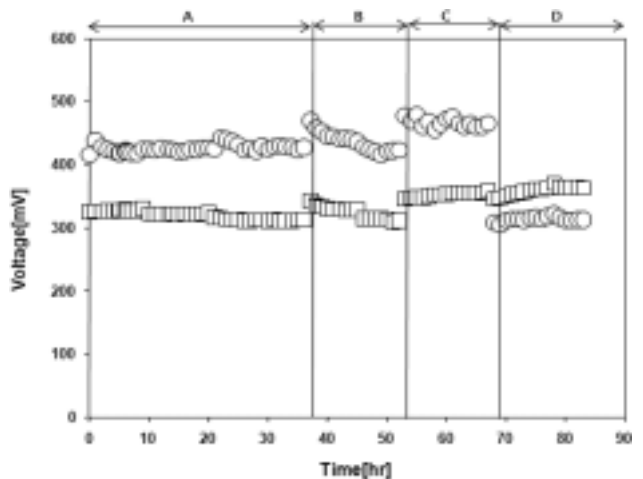


Fig. 2. Voltage generated (mV) from single and stacked MFC with different DO concentrations over time; □, single MFC; ○, stacked MFC; A, DO 9 mg/L; B, DO 7 mg/L; C, DO 5 mg/L; and D, DO 3 mg/L.

Table 1. Average power density, Coulombic efficiency and COD removal efficiency of single and stacked MFC with different DO concentrations in cathode chamber at external resistance 200Ω

DO con.(mg/L)	9		7		5		3	
Characteristic	S-MFC ^a	ST-MFC ^b	S-MFC	ST-MFC	S-MFC	ST-MFC	S-MFC	ST-MFC
Power density (W/m ³)	28.23	8.38	29.95	8.74	34.43	10.07	35.74	4.53
Coulombic efficiency (%)	10.55	13.89	11.32	14.55	11.58	14.54	11.76	10.22
COD removal efficiency (%)	89.80	89.54	83.70	89.55	92.02	93.68	90.61	92.66

^a Single MFC
^b Stacked MFC

감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 산화전극에서 전달되는 전자를 환원반응을 통하여 충분히 소비하기에는 환원전극에 전자수용체로서 존재하는 산소의 양이 부족하였기 때문인 것으로 사료된다. Wang과 Han¹¹⁾은 직렬로 연결되는 MFC의 수가 많아질수록 내부저항이 증가하여 전자의 손실이 발생한다고 보고하였다.

운전기간동안 각 DO 농도에 따른 COD 제거율, 전력밀도(W/m³), 쿨롱 효율은 Table 1에 나타내었다. 외부저항이 200 Ω일 때, 단일 MFC의 전력밀도는 DO농도가 3 mg/L에서 35.7 W/m³로 가장 높은 값을 나타냈다. 쿨롱 효율은

약 11.8%였으며, COD 제거율은 90.6%였다. 직렬연결 MFC는 DO농도가 5 mg/L에서 10.1 W/m³로 가장 높은 값을 나타냈다. 쿨롱 효율은 14.5%였으며, COD 제거율은 93%였다. 반응기 형태, 식종미생물, 기질종류 및 농도 등이 다르기 때문에 MFC에 관한 다른 연구와의 직접적인 비교는 어렵지만 acetate를 기질로 이용한 Liu 등¹²⁾의 최대전력 밀도 13 W/m³보다 2배 이상 높은 것으로 나타났으며, 산소와 과산화수소를 동시에 환원전극의 전자수용체로 이용한 Tartakovsky & Guiot¹³⁾의 최대전력밀도 700 W/m³보다 약 20배 정도 낮은 것으로 나타났다.

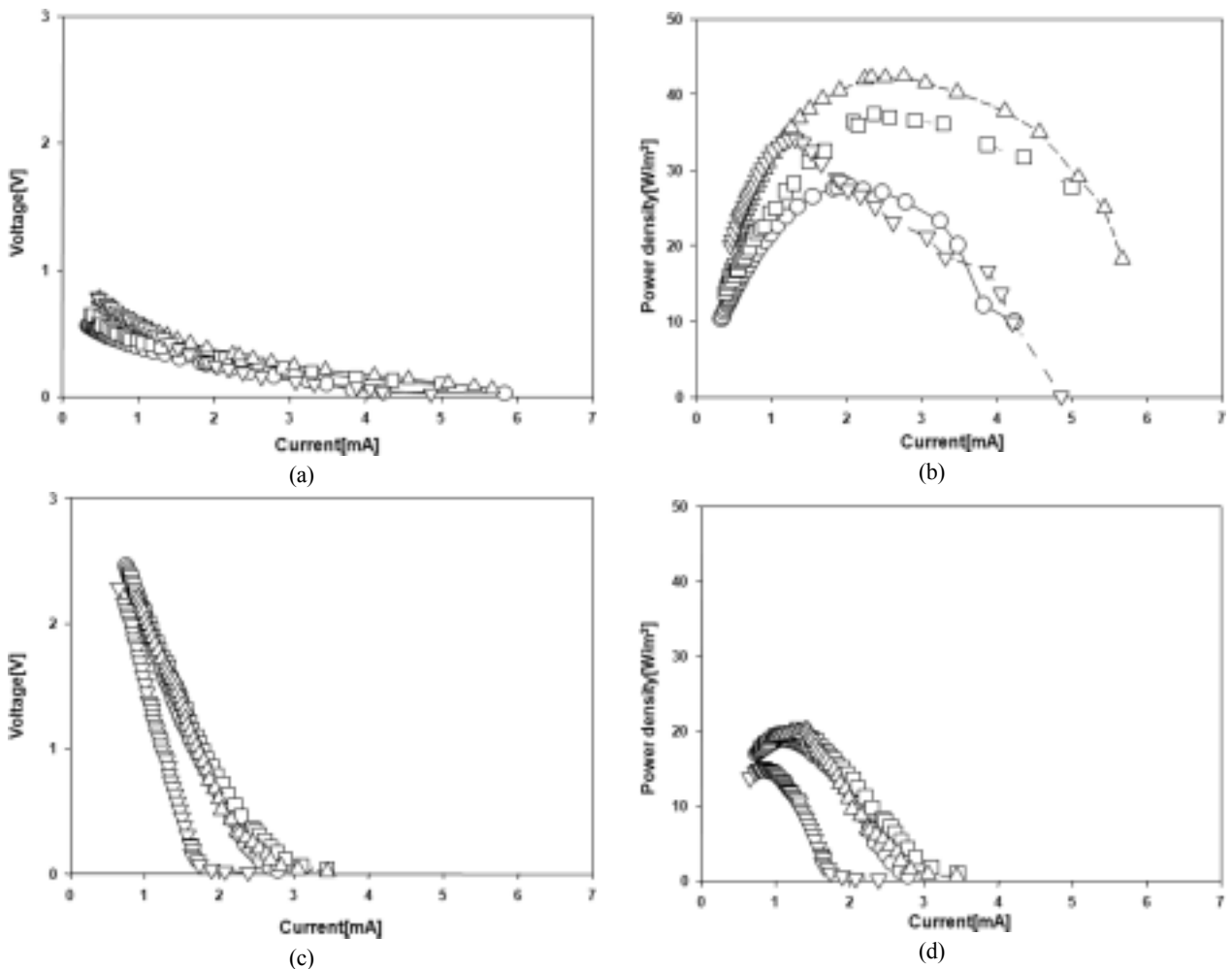


Fig. 3. Voltage(a) and power density(b) generated from the single MFC and voltage(c) and power density(d) the stack MFC with different currents; ○, DO 9 mg/L; □, DO 7 mg/L; △, DO 5 mg/L; ▽, DO 3 mg/L.

3.2. DO 농도변화에 따른 최대전력발생량 비교

각 DO 조건에서 저항을 달리하여 전류의 변화에 따른 전압 및 전력밀도를 측정하였다(Fig. 3). 단일 MFC는 DO 5 mg/L일 때 전력밀도가 42.3 W/m³으로 가장 높았으며, 직렬연결 MFC도 DO 5 mg/L일 때 20.1 W/m³으로 최대 전력밀도를 나타냈다. MFC의 전압-전류곡선의 기울기 값은 내부저항을 의미하며, 외부저항과 내부저항이 동일한 지점에서 최대전력밀도를 구할 수 있다.²⁾ 본 연구에서 직렬연결 MFC의 전압-전류곡선의 기울기는 약 0.83으로 단일연결 MFC의 기울기 0.12보다 약 7배 정도 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 직렬연결 MFC는 외부저항이 약 1,500 Ω일 때 전력밀도가 최대였지만, 단일 MFC는 약 180 Ω일 때 최대전력밀도를 나타내었다(Fig. 3). 이를 통해서 직렬연결 MFC가 단일 MFC에 비하여 내부저항이 높은 것을 확인할 수 있었으며, ohmic loss에 의한 전자손실이 상대적으로 높은 것으로 판단된다.³⁾

Wang & Han¹⁾은 단일 MFC와 동일한 MFC 4개가 연결된 직렬연결 MFC의 전력밀도는 각각 26.2 W/m³과 14.7 W/m³으로 직렬연결 MFC의 높은 내부저항으로 인하여 단일 MFC의 전력밀도가 약 2배 이상 높았다고 보고하였다. 본 실험에서도 직렬연결 MFC는 단일 MFC보다 6배 이상 전력밀도가 높을 것으로 예상하였지만, 운전결과 직렬연결 MFC의 전력밀도는 단일 MFC에 비하여 약 2배 정도 낮은 것을 확인할 수 있었다. Aelterman 등⁶⁾은 높은 전류가 흐를 때에는 직렬연결된 모든 MFC에 충분한 양의 기질이 안정적으로 공급되더라도 일부 미생물군집의 기질 전환 능력에 제한이 생기게 되고, 결과적으로 연결된 단위 MFC 사이에 전위차이에 의한 전위역전 현상이 발생함으로써 전체 직렬연결 MFC의 전기발생량이 감소한다고 주장하였다. 그리고 직렬연결 MFC를 단위 MFC들로 각각 분리한 뒤에는 정상적인 전력발생 능력을 회복하였다고 보고하였다. 본 연구에서도 일부 단위 MFC의 전위역전 현상으로 인하여 직렬연결 MFC의 전체 전기발생량이 감소한 것으로 사료된다.

3.3. 분리된 단위 MFC의 전력발생량 비교

MFC 운전 60일 경과 후, 단일 MFC의 전력발생량은 안정적으로 유지되었으나, 직렬연결 MFC의 전력발생량은 약 250 mV까지 지속적으로 감소하였다. 이에 직렬연결된 MFC들을 분리하여 단위 MFC 각각의 전기발생량을 측정하였다(Fig. 4). MFC 1과 MFC 2의 경우, 분리 초기에는 각각 200 mV와 180 mV의 높은 전위를 나타내었으나, 3~5 시간이 경과한 이후에는 발생하는 전위값이 140~190 mV의 범위에서 큰 폭으로 변동하였다. MFC 3의 경우에는 초기 2시간 동안 접촉불량으로 사료되는 원인으로 전혀 전력발생이 확인되지 않았으나 2시간 이후에는 MFC 4와 함께 200 mV 정도의 높은 전위를 안정적으로 유지하였다. MFC 5와 MFC 6은 50 mV 이하의 아주 낮은 전위를 나

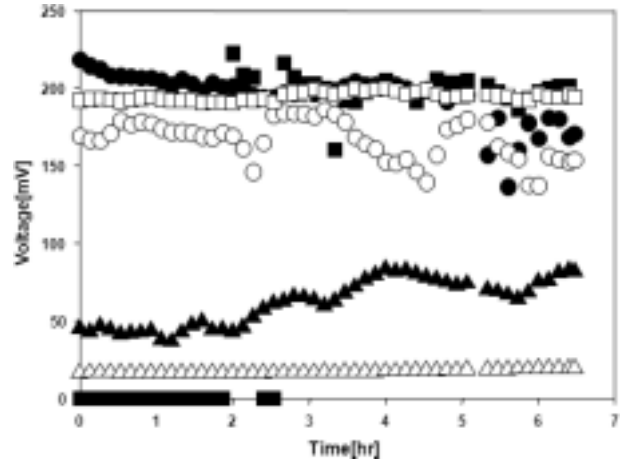


Fig. 4. Voltages generated from six individual microbial fuel cells after disconnection of stacked MFC; ●, MFC 1; ○, MFC 2; ■, MFC 3; □, MFC 4; ▲, MFC 5; △, MFC 6.

타내었다. MFC 5의 경우에는 시간의 경과에 따라 80 mV까지 서서히 전력발생이 회복되는 경향을 보였으나, MFC 6은 20 mV의 낮은 전위를 유지하였다. 전체적으로 볼 때, 가운데에 위치한 MFC 3과 MFC 4는 안정적인 전력발생량을 보인 반면, 양단에 위치한 단위 MFC들의 전력발생량은 불안정하였으며, 특히, 마지막 환원전극을 가지는 MFC 6의 경우에는 가장 낮은 전력발생량을 나타내었다.

전기발생량이 낮았던 MFC 6에 의한 전위역전현상을 확인하기 위하여 MFC 6과 전기발생량이 가장 높고 안정적이었던 MFC 4를 직렬로 연결하여 전기발생량을 관찰하였다. 전기발생량 200 mV의 MFC 4와 20 mV의 MFC 6을 직렬연결하자 전기발생량은 50 mV으로 급격하게 감소하였으며, 두 MFC를 다시 분리하자 원래의 전기발생량으로 회복하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5). 따라서 직렬연결 MFC의 전력발생량이 낮았던 이유는 MFC 6을 비롯한 낮은 전위값을 갖는 단위 MFC들에 의해 직렬 연결된 단위 MFC사이에 전위역전이 발생하게 되고, 결과적으로 전체 전력발생량이 낮아진 것으로 추정된다.

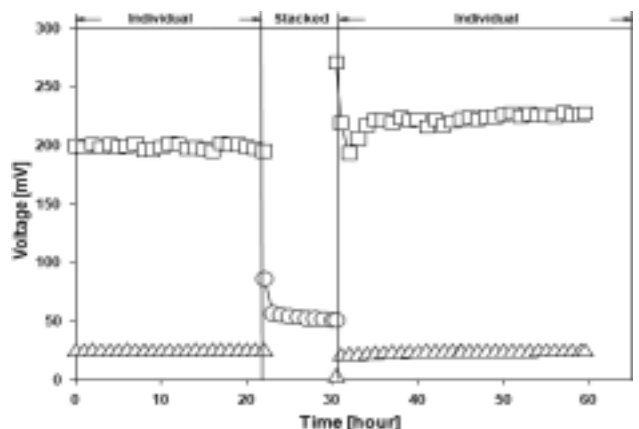


Fig. 5. Individual and stacked cell voltages in single cell and stack mode with MFC 4 and MFC 6.

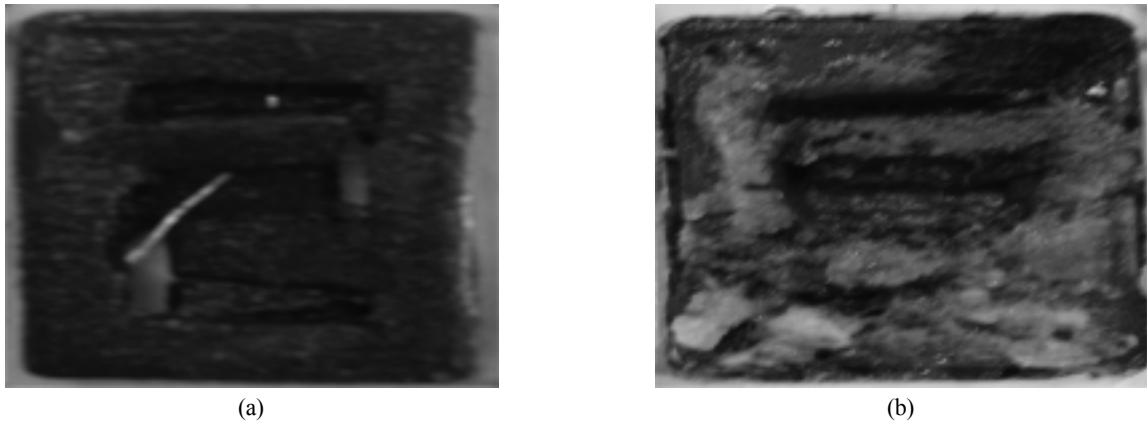


Fig. 6. Salt formation on anode surface contacting with membrane in the MFC 4 (a) and MFC 6 (b).

Aelterman 등⁶⁾은 직렬연결 MFC를 이용하여 외부저항 변화에 따른 전기발생량을 측정하고, 100 Ω 이하로 낮은 외부저항에서는 일부 미생물의 기질전환 능력의 제한으로 최대 990 mV 전압차이가 발생하였으나, 직렬연결을 분리하고 난 뒤에는 단위 MFC의 전기발생량이 회복되었다고 보고하였다. 그러나 본 실험에서 가장 낮은 전력발생량을 보인 MFC 6의 경우, 분리된 이후에도 전혀 전력발생 능력을 회복하지 못하였기 때문에 생물학적 원인 이외의 다른 원인에 의해서 단위 MFC사이의 전기발생량의 차이가 발생한 것으로 사료되었다. Oh 등⁷⁾도 살균한 직렬연결 MFC에서 전위역전현상이 발생함을 발견함으로써 미생물이 존재하지 않는 상황에서도 전위역전이 발생 가능함을 보고하였다.⁶⁾

실험 종료 후에 단위 MFC들을 분해하여 전극을 관찰한 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 멤브레인과의 접촉면에 염이 형성된 것을 관찰할 수 있었으며, 단위 MFC마다 산화전극표면에 생성된 염의 양이 달랐다. 직렬연결 MFC에서는 높은 전류발생을 위하여 많은 양의 수소이온이 멤브레인을 통해 산화전극부에서 환원전극으로 이동하여야 하지만 수소이온뿐만 아니라 산화전극부내의 Mg^{2+} , Ca^{2+} 등 다량의 다른 양이온들도 멤브레인 쪽으로 이동하게 된다. 양이온들은 유기물 분해에서 발생하거나 환원전극에서 멤브레인을 통과하여 전달된 CO_3^{2-} 와 반응하게 되면 멤브레인의 표면에 침전물을 형성하게 되고 이러한 침전물의 형성이 수소이온의 전달을 방해하여 전력발생량이 낮아지는 것으로 추정된다. 각 단위 MFC마다 형성된 염의 양이 다른 것은 설명하기 힘들지만, 단위 MFC의 배치순서에서 발생하는 외부저항의 작은 차이와 기질을 분해하는 미생물군집의 활성의 차이에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 형성된 염의 양의 차이에 따라 각 단위 MFC사이의 전위역전이 발생하게 되고, 결과적으로 직렬연결 MFC의 성능이 낮아진 것으로 사료된다.

4. 결론

산화전극부의 기질로 acetate를 이용하고, 환원전극의 전

자수용체로 용존산소를 이용하는 단일 MFC와 직렬연결 MFC에 있어서, 환원전극의 유입수내 용존산소 농도의 변화가 MFC 효율에 미치는 영향을 평가하고, 직렬연결 MFC의 전력발생량 저하의 원인을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 환원전극의 유입수 유량이 4 mL/min일 때, 각 DO 농도조건에서 단일 MFC의 최대 전력밀도의 크기는 DO 5 > 7 > 3 > 9 mg/L 순서였으며, 직렬연결 MFC의 최대 전력밀도의 크기는 DO 5 > 7 > 9 > 3 mg/L 순서로 나타났다. 따라서 환원전극의 DO 농도는 MFC 설계 및 운전 시에 중요한 제어인자로 고려되어야 할 것으로 판단되었다.
- 2) 직렬연결 MFC에서는 염의 형성에 따른 일부 MFC의 전위역전현상으로 인하여 전체 전력발생량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 향후 MFC 설계 및 운전 시에 안정적인 전기발생량을 위해서 연결방법도 고려해야 될 것으로 판단되었다. 만약 직렬연결 MFC를 사용해야 한다면, 전기발생량이 감소한 단위 MFC를 선택적으로 교환할 수 있는 방안이 필요한 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(KRF-2007-331-D00229), 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

1. 산업자원부, 에너지 백서(2007).
2. Logan B. E., "Microbial Fuel Cells," WILEY-InterScience (2007).
3. Hamid, R. Y., Carver, S. M., Christy, A. D., and Tuovinen, O. H., "Cathodic limitations in microbial fuel cells: An overview," *J. Power Sources*, **180**, 683~694 (2008).

4. 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," *Biotechnol. Advances*, **25**, 464~482(2007).
5. He, Z. and Angenent, L. T., "Appliacation of bacterial biocathode in microbial fuel cells," *Electroanalysis*, **18**(19-20), 2009~2015(2006).
6. Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H. T., Boon, N., and Verstraete, W., "Continous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(10), 3388~3394(2006).
7. Oh, S. E. and Logan, B. E., "Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation," *J. Power Sources*, **167**, 11~17(2007).
8. Chae, K. J., Choil, 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 Fuels*, **22**(1), 169~176(2008).
9. Gil, G. C., Chang, I. S., Kim, B. H., Kim, M., Jang, J. K., Park, H. S., and Kim, H. J., "Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell," *Biosens. Bioelectron.*, **18**(4), 327~334(2003).
10. Pham, T. H., Jang, J. K., Chang, I. S., and Kim, B. H., "Improvement of cathode reaction of a mediatorless microbial fuel cell," *J. Microb. Biotechnol.*, **14**(2), 324~329(2004).
11. Wang, B. and Han, J. I., "A single chamber stackable microbial fuel cell with air cathode," *Biotechnol. Lett.* (2008).
12. Liu, H., Cheng, S., and Logan, B. E., "Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell," *Environ. Sci. Technol.*, **39**(2), 658~662(2005).
13. Tartakovsky, B. and Guiot, S. R., "A comparison of air hydrogen oxygenated microbial fuel cell reactors," *Biotechnol. Prog.*, **22**(1), 241~246(2006).