

# 이형반응기 미생물연료전지의 전기적 특성에 미치는 외부저항의 영향

## Effect of External Resistance on Electrical Properties of Two-Chamber type Microbial Fuel Cells

이명은 · 조세연 · 정재우<sup>†</sup> · 송영채\* · 우정희\* · 유규선\*\* · 이채영\*\*\*  
Myoung-Eun Lee · Se-Yeon Jo · Jae-Woo Chung<sup>†</sup> · Young-Chae Song\*  
Jung-Hui Woo\* · Kyu-Seon Yoo\*\* · Chae-Young Lee\*\*\*

경남과학기술대학교 환경공학과, 녹색기술연구소 · \*한국해양대학교 환경공학과  
\*\*전주대학교 토목환경공학과 · \*\*\*수원대학교 토목공학과

Department of Environmental Engineering, Green Technology Institute, Gyeongnam National University of Science and Technology

\*Department of Environmental Engineering, Korea Maritime University

\*\*Department of Civil & Environmental Engineering, Jeonju University · \*\*\*Department of Civil Engineering, The University of Suwon

(2011년 2월 14일 접수, 2011년 3월 24일 채택)

**Abstract :** The Effects of external resistance on electrical properties such as current density, power density and coulombic efficiency were investigated in two-chamber type MFCs using a ferricyanide as reducing agent. A stable electricity was produced when a constant time elapsed after inoculation of mixed cultures into the anode compartment; voltages from 0.13 to 0.16 V was measured at 50  $\Omega$  of external resistance. When the external resistance was increased, the current density decreased and the power density rapidly increased and then slowly decreased. Big variation of electrical properties was observed in high-current density region due to the concentration loss related with substrate consumption in repeated experiments changing the external resistance. The maximum power density (175.8 mW/m<sup>2</sup>) and coulombic efficiency (46.1%) were obtained at 100  $\Omega$  of the external resistance which is nearest with the internal resistance (134  $\Omega$ ) of MFC system.

**Key Words :** Microbial Fuel Cell, External Resistance, Electrical Properties, Coulombic Efficiency

**요약 :** Ferricyanide를 환원제로 사용하는 이형반응기 미생물연료전지 시스템에서 전류밀도, 전력밀도, 쿨롱효율 등의 전기적 특성에 미치는 외부저항의 영향을 규명하고자 하였다. 음극반응기에 미생물을 접종하고 일정한 시간이 경과하면 안정적인 전기가 생산되었으며 50  $\Omega$ 의 외부저항에서 0.13~0.16 V 범위의 전압이 발생되었다. 외부저항이 증가함에 따라 전류밀도는 감소하였으며 전력밀도는 일정한 값까지는 급격하게 증가하다가 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 외부저항을 단계적으로 감소시키는 반복실험을 수행한 결과, 일정한 범위의 전류밀도까지는 측정값들의 편차가 크지 않았으나 높은 전류밀도 영역에서는 기질소모로 발생하는 농도손실의 영향으로 측정값의 변동성이 매우 크게 나타났다. 전력밀도 및 쿨롱효율은 MFC 시스템의 내부저항(134  $\Omega$ )과 가까운 100  $\Omega$ 의 외부저항에서 각각 175.8 mW/m<sup>2</sup>과 46.1%의 최대값을 가지는 것으로 나타났다.

**주제어 :** 미생물연료전지, 외부저항, 전기적 특성, 쿨롱효율

## 1. 서론

미생물연료전지(MFC, microbial fuel cell)는 유기물이 지니고 있는 화학에너지를 전기적 활성을 가진 미생물의 촉매작용을 이용하여 전기에너지로 변환시키는 기술이다.<sup>1-3)</sup> MFC는 현재 사용되고 있는 폐수처리 시스템들을 대체할 수 있는 잠재적인 기술로서 주목받고 있다. MFC는 미생물에 의해 유기물의 산화가 이루어지는 음극(anode), 음극에서 생성된 전자, 양성자, 환원제의 반응에 의해 환원이 일어나는 양극(cathode) 그리고 이들을 공간적으로 분리하는 분리막, 음극과 양극을 전기적으로 연결하는 전기회로로 구성된다.<sup>1,4)</sup>

MFC 기술을 폐수처리에 적용하기 위해서 해결되어야 할 여러 가지 과제가 남아있는 상태이다. 첫째, 전력수율 및 쿨롱효율과 같은 전기적 성능이 향상될 필요가 있으며,<sup>2,5)</sup> 둘째, MFC 기술의 경제적 타당성이 확보되어야 하고, 마지

막으로 공정의 최적화를 달성하기 위해서는 MFC에서 일어나는 반응기작과 이에 영향을 미치는 다양한 운전변수의 영향에 관한 명확한 규명이 필요하다.

지난 20년간에 걸쳐 이루어진 강도 높은 연구로 인해 MFC로부터 얻을 수 있는 전력수율은 크게 증가하여 왔다.<sup>6-9)</sup> 2000년대 초반의 MFC 연구들에서 얻어진 수  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  수준의 전력수율은 전극 단면적의 증가, 새로운 전극물질 적용, 시스템 설계 및 구조 변경 등을 통해 꾸준히 증가하여 왔다. 현재까지의 MFC 연구에서 얻어진 최대 전력수율은 5,850 mW/m<sup>2</sup>으로 연구의 초기단계보다 크게 증가하였다.<sup>10)</sup> 이와 더불어 MFC 기술의 경제적 타당성을 높이기 위해 다양한 재료의 개발을 위한 연구들이 강도 높게 이루어지고 있다. 환원촉매로 널리 활용되고 있는 백금과 음극과 양극을 분리하기 위해 사용되는 양이온 교환막(PEM, proton exchange membrane)은 매우 고가이므로 이를 대체할 수

있는 재료가 개발되어야 한다.<sup>2,5,11,12</sup> 백금 촉매를 대체하기 위해 FePc (iron(II) phthalocyanine)이나 CoTMPP (cobalt-tetramethyl phenylporphyrin)와 같은 저가의 촉매물질을 개발하기 위한 연구들이 이루어져 왔으며 탄소나노튜브(CNT, carbon nano tube) 등을 활용함으로써 촉매를 사용하지 않는 조건에서 환원반응의 활성을 높이기 위한 노력들이 이루어지고 있다.<sup>13,14</sup> 또한, 비교적 고가인 PEM을 대체하거나 사용하지 않는 형태의 MFC 개발에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다.<sup>15-17</sup>

MFC의 전기적 성능 향상 및 경제적 타당성 확보와 더불어 MFC의 반응기작과 운전변수의 영향에 대한 규명은 필수적이다. 현재까지 수행된 많은 실험실 규모 실험으로부터 MFC 성능에 미치는 다양한 운전변수의 영향과 생물 및 전기화학적 특성규명에 대한 상당한 진전이 이루어져왔으나 아직 규명되어야 할 특성들이 많이 남겨진 상태이다. 특히, MFC의 전기적 성능에 미치는 전기회로 구성에 대한 연구는 상당히 미흡한 상태이며 시스템의 최적화를 위해 반드시 수행되어야 할 과제이다. 본 연구에서는 이를 위한 연구로서 Ferricyanide를 환원제로 사용하는 이형 반응기 MFC 시스템을 구성하여 시스템의 전기적 특성에 미치는 외부저항의 영향을 규명하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

본 연구에서 구성된 MFC 시스템을 Fig. 1에 나타내었다. 이형반응기로 제작되었으며 양이온 교환막(Nafion, Dupont, USA)을 사이에 두고 음극부와 양극부를 설치하였다. 양극 및 음극 반응기는 유리를 사용하여 각각 160 mL의 체적으로 제작되었다. 양극 및 음극 전극으로 40×50 mm<sup>2</sup>(두께 10 mm)의 흑연펠트(Morgan, UK)를 사용하였다. 전극으로부터 외부 전기회로를 구성하기 위해 titanium wire를 사용하였으며 외부 가변저항과 연결하였다.

음극에 미생물을 접종시키기 위해 J 하수처리장 혐기성 소화조의 슬러지를 Table 1에 나타낸 조성을 가진 인공폐수와 1:1로 섞어서 일주일동안 정치시켰다. 인공폐수는 기질로서 글루코오스(COD 기준, 1000 mg/L)를 사용하였으며 영양염류 및 비타민을 소량 혼합하였으며 전도도를 조절하기 위해 NH<sub>4</sub>Cl 및 KCl을 사용하였다. 음극에 미생물 접종이 이루어진 후에 전극의 양단에 인가되는 전압을 관찰하면서 인공폐수를 주기적으로 주입하였다. 인공폐수의 초기 pH 및 전도도는 각각 7.2~7.6, 32.2~35.4 mS/cm의 범위를 가진다. 환원반응이 일어나는 양극 반응기에는 50 mM의 Ferricyanide 용액을 환원제로 사용하였다. 음극과 양극 용액의 pH를 유지시키기 위해 50 mM의 인산염 완충액이 사용되었다. 음극 및 양극 반응기로 주입된 용액의 양은 150 mL이었으며 모든 실험은 30℃로 유지되는 온도 조절용 상자내에서 회분식으로 진행되었다.

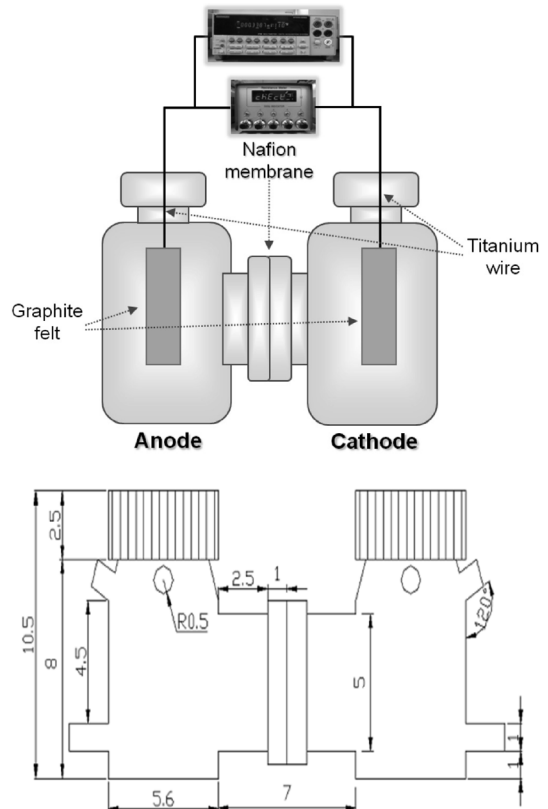


Fig. 1. Schematic diagram of microbial fuel cell.

Table 1. Composition of artificial wastewater

Component	Content
Glucose (g/L)	1.09
NH <sub>4</sub> Cl (g/L)	0.31
KCl (g/L)	0.13
NaHCO <sub>3</sub> (g/L)	16.8
Mineral (mL)	12.5
Vitamin (mL)	12.5
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (g/L)	5.36
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (g/L)	2.50

### 2.2. 측정 및 분석 방법

MFC 시스템의 전기적 특성은 음극과 양극을 외부저항과 연결하고 저항 양단에 생성되는 전압을 측정하여 관찰하였다. 유기물의 전기화학적 산화반응에 의해 생성되는 전류(I), 저항(R), 전압(E) 및 전력(P)은 각각 식 (1)과 (2)의 관계를 갖는다. 외부저항으로 0~1,000 Ω 범위에서 조절할 수 있는 가변저항기를 이용하였으며 전압 측정을 위해 multimeter (Keithley 2700, USA)를 사용하였다. 초기 MFC 운전에서 미생물 접종을 위해 외부저항이 50 Ω인 조건을 유지시켰으며 안정화된 MFC의 polarization 및 power 곡선을 얻기 위해서 전류가 흐르지 않는 조건에서의 OCV (open circuit voltage)를 측정 후 1,000 Ω에서 3 Ω으로 단계적으로 저항을 변화시키면서 전압을 측정하였다. MFC는 다양한 형태의 구조를 가지므로 실험에서 얻어진 결과를 상호 비교하

기 위해서 전극의 단면적에 의해 정규화된(normalized) 지표들이 활용된다. 따라서 실험에서 조건별로 얻어지는 전류 및 전력은 전극 단면적(58 cm<sup>2</sup>)으로 나누어 얻어지는 전류밀도 및 전력밀도의 값으로 나타내었다.

MFC 시스템의 쿨롱효율에 미치는 외부저항의 영향을 관찰하기 위해 저항을 500에서 50 Ω으로 낮추면서 각 저항 조건에서 각각 2회씩 반복하여 실험하였다. 각 조건별로 안정된 전압의 5% 수준의 전압이 얻어질 때 실험을 중단하고 COD를 분석한 후 쿨롱효율을 계산하였다. COD 분석은 일정량의 시료를 채취하여 1.2 μm의 여과지를 통과시킨 후에 Standard method에 따라 이루어졌다.<sup>18)</sup> 유기물 산화로부터 이론적으로 얻을 수 있는 전하량에 대한 실제로 얻어지는 전기 전하량의 비로 정의되는 쿨롱효율(C<sub>E</sub>)은 식 (3)에 따라 계산하였다.<sup>2,4)</sup> F는 패러데이 상수(96,500 C/mol)이며 ν<sub>an</sub>은 음극 반응기의 체적, ΔCOD는 제거되는 COD의 양을 나타낸다.

$$I(A) = \frac{E(V)}{R(\Omega)} \quad (1)$$

$$P = IV = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

$$E_C = \frac{8 \int_0^{t_b} I dt}{F \nu_{an} \Delta COD} \quad (3)$$

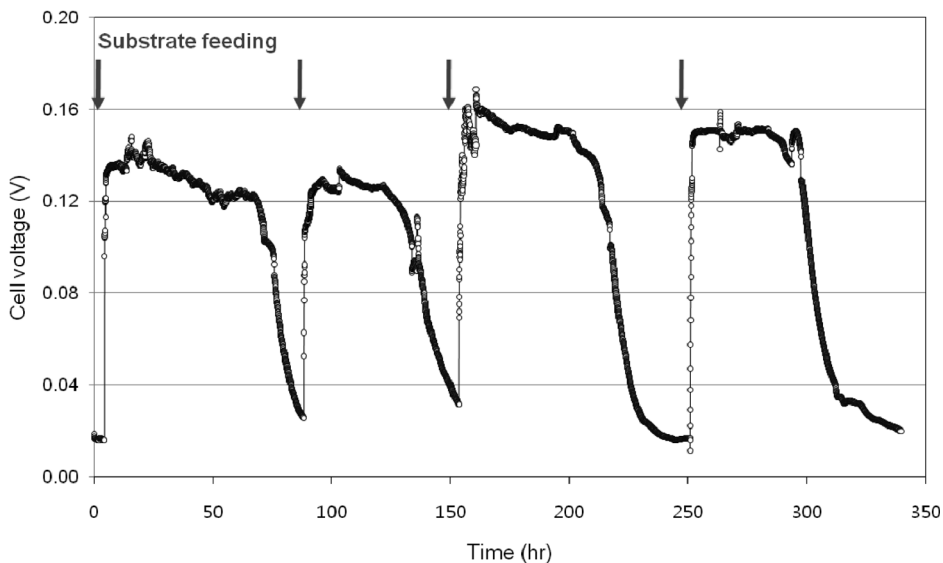
### 3. 결과 및 고찰

미생물 접종이 완료된 후 외부저항이 50 Ω인 조건에서 안정적인 운전이 이루어질 때 관찰된 시간에 따른 전압 측정결과를 Fig. 2에 나타내었다. 음극 반응기에 인공폐수 공

급이 이루어지면 미생물에 의한 전기 생산이 이루어져 전압이 빠른 속도로 상승하며 일정한 범위의 값으로 유지되다가 약 3일이 경과한 후에 기질 소비로 전압이 감소되는 현상이 나타났다. 기질 소모로 인한 전압 강하 현상은 음극에 인공폐수를 재공급함으로써 복구된다. 이러한 결과는 전형적인 batch 형태의 MFC 반응기로부터 얻어지는 결과로서 유기물로부터 안정적인 전기생산이 가능함을 보여준다.<sup>4,13)</sup> 이와 더불어 기질 공급이 반복됨에 따라 전압이 서서히 상승하는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 유기물을 산화시켜 전기를 생산할 수 있는 미생물의 성장에 따라 얻어진 결과로 판단된다. 외부저항이 50 Ω인 조건에서 얻어지는 전

**Table 2.** Electrical properties of MFC with variation of external resistance

Resistance (Ω)	Voltage (V)		Current (mA)		Power (mW)	
	Avg.	Sd.	Avg.	Sd.	Avg.	Sd.
∞	0.76	0.012	0.00	0.000	0.00	0.000
1000	0.67	0.004	0.67	0.004	0.44	0.006
800	0.65	0.005	0.82	0.006	0.53	0.007
500	0.59	0.004	1.17	0.008	0.69	0.009
400	0.56	0.003	1.40	0.006	0.79	0.007
300	0.51	0.003	1.71	0.010	0.88	0.010
200	0.45	0.005	2.23	0.024	0.99	0.021
100	0.32	0.004	3.19	0.040	1.02	0.026
90	0.30	0.005	3.34	0.050	1.00	0.030
80	0.28	0.006	3.51	0.070	0.99	0.039
50	0.21	0.004	4.13	0.070	0.85	0.029
30	0.14	0.006	4.74	0.184	0.68	0.052
10	0.06	0.010	6.07	1.002	0.37	0.126
8	0.05	0.009	6.29	1.161	0.32	0.123
6	0.04	0.009	6.44	1.549	0.26	0.126
5	0.03	0.006	6.60	1.249	0.22	0.086
3	0.02	0.005	6.44	1.503	0.13	0.059



**Fig. 2.** Cell voltages measured from initial MFC operation (external resistance : 50 Ω).

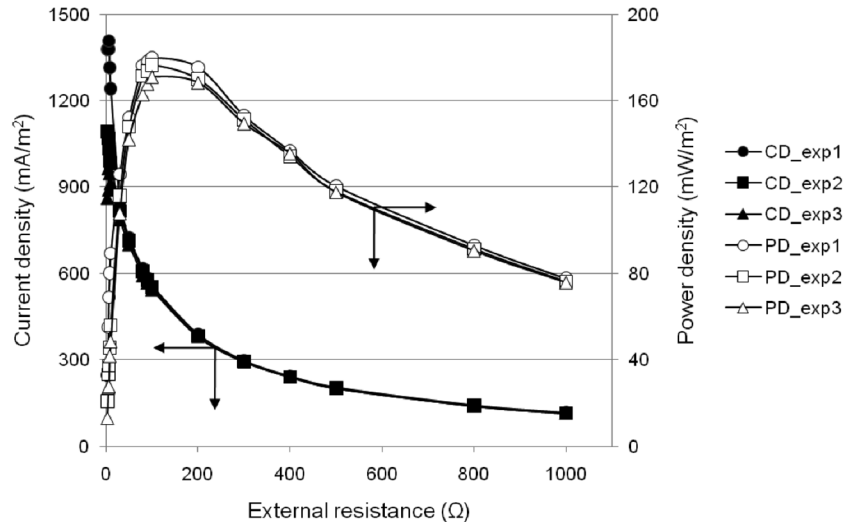


Fig. 3. Effect of external resistance on current and power densities.

압은 약 0.13~0.16 V 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다.

MFC의 안정적인 운전이 이루어진 후에 외부저항을 1,000 Ω으로부터 3 Ω으로 단계적으로 감소시키면서 3회 측정하여 얻어진 주요 전기적 특성값의 평균값과 표준편차를 Table 2에 나타내었다. MFC 시스템의 전류가 흐르지 않는 조건에서 측정된 OCV의 값은 0.75~0.77 V(평균 0.76 V, 표준편차 0.012)의 값을 가지는 것으로 나타났으며 외부저항의 감소에 따라 전류가 증가하고 전압이 단계적으로 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 실험된 외부저항의 범위에서 전압은 0.02~0.67 V, 전류는 0.67~6.44 mA의 범위를 가지며 최대 전력은 외부저항이 100 Ω인 조건에서 1.02 mW의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이와 더불어 전기적 특성값의 표준편차는 외부저항이 높은 영역에서는 낮게 나타나고 외부저항이 낮은 영역으로 갈수록 증가하며, 특히 30 Ω 이하의 외부저항에서는 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3회에 걸쳐 이루어진 반복실험으로부터 얻어진 전류밀도 및 전력밀도에 미치는 외부저항의 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 전류밀도의 평균값과 표준편차는 외부저항이 3 Ω인 조건에서 1111.1 mA/m<sup>2</sup> (Sd. = 259.152)이었으며 저항의 증가에 따라 크게 감소하여 1,000 Ω인 저항에서는 114.9 mA/m<sup>2</sup> (Sd. = 0.718)의 값을 가지는 것으로 나타났다. 전력밀도는 일정한 값의 외부저항까지는 급격하게 증가하다가 추가적인 외부저항의 증가에 따라 서서히 감소하는 현상을 보여준다. 전력밀도는 외부저항이 100 Ω인 조건에서 175.8 mW/m<sup>2</sup> (Sd. = 4.443)의 최대값을 가지는 것으로 나타났다. 앞에서 설명한 바와 같이 반복실험에 의해 얻어진 전류밀도 및 전력밀도의 값은 대략 30 Ω보다 낮은 저항에서는 큰 범위의 표준편차를 가지며 그 이상의 저항에서는 매우 낮은 값의 표준편차를 가져 일정한 값들을 가지는 것으로 나타났다. 외부저항이 낮은 조건에서 실험데이터가 가지는 높은 변동성은 아래에서 고찰하였다.

실험에서 얻어진 결과를 정리하여 MFC 시스템의 전기적 특성을 분석하기 위해 널리 활용되는 polarization 및 power

곡선을 그린 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 전류밀도가 증가함에 따라 전압은 거의 선형적으로 감소하는 현상을 관찰할 수 있으며 전력밀도는 일정한 값의 전류밀도까지는 선형적으로 증가하다가 최대값을 가진 후에 감소하는 것으로 나타났다. 최대 전력밀도는 전류밀도가 550.6 mA/m<sup>2</sup>인 조건에서 약 175.8 mW/m<sup>2</sup>의 값을 가지는 것으로 나타났다.

전류-전압 곡선의 경우에, 약 820 mA/m<sup>2</sup>의 전류밀도까지는 전압이 큰 변화없이 선형적으로 감소하였으며 그보다 높은 전류밀도 영역에서는 실험조건별로 얻어지는 전압이 큰 차이를 가지는 현상이 관찰되었다. 일반적으로 MFC의 전압강하는 1) 낮은 전류밀도 영역에서 발생하는 급격한 전압강하, 2) 비교적 넓은 영역의 전류밀도 영역에서 발생하는 선형적인 전압강하, 3) 높은 전류밀도 영역에서 발생하는 급격한 전압강하로 구분된다.<sup>2,4,5)</sup> 높은 전류밀도 영역에서 일어나는 전압강하는 물질전달 현상과 관련하여 일어나는 concentration loss이다.<sup>2,4)</sup> 즉, 전극으로의 반응물질이나 전극으로부터 생성물질의 물질전달이 불충분하여 전극 반응속도가 제한을 받을 때 일어나는 현상이다. 실험에서 얻어진 높은 전류밀도 영역에서의 전압값들이 지니는 높은 변동성은 실험이 진행됨에 따라 기질이 소모됨으로써 일어나는 현상인 것으로 해석할 수 있다. 즉, 음극으로 인공폐수를 공급한 후에 처음으로 수행된 실험(exp1)에서 마지막으로 수행된 실험(exp3)으로 실험이 진행됨에 따라 높은 전류밀도 영역의 전압이 낮아지는 경향을 보이고 있으며 이러한 결과는 실험의 반복에 따라 음극 반응기의 기질이 소모됨으로써 음극전극으로의 기질 전달이 원활하게 이루어지지 못하여 일어나는 현상인 것으로 판단된다.

실험된 MFC 시스템의 내부저항을 알아보기 위해 전압강하가 선형적으로 일어나는 영역의 전류 및 전압의 평균값을 취하여 Fig. 5에 나타내었다. MFC의 전력밀도는 외부저항과 내부저항이 같은 조건에서 최대값을 가지며 내부저항은 전류의 증가에 따라 선형적인 전압강하가 일어나는 영역의 기울기로부터 구할 수 있다.<sup>4,5)</sup> 그림으로부터 실험된 MFC의

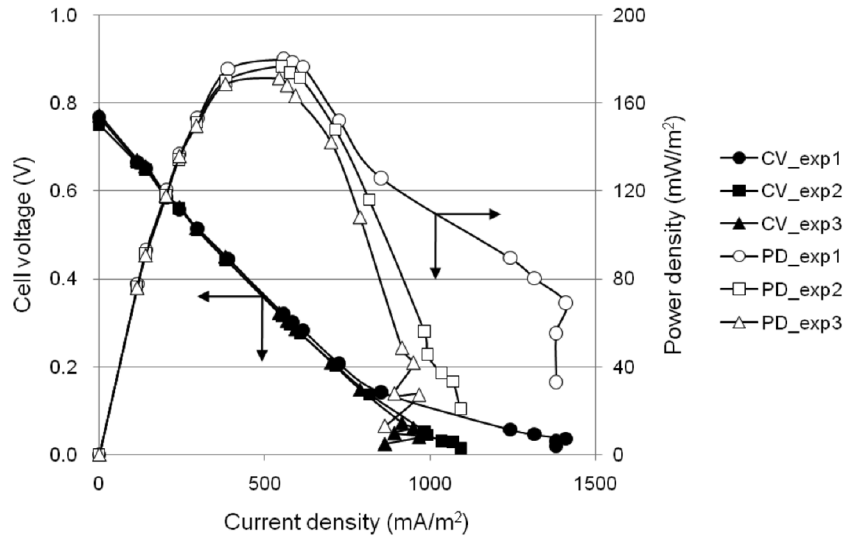


Fig. 4. Polarization (CV) and power (PD) curves obtained in the experiments.

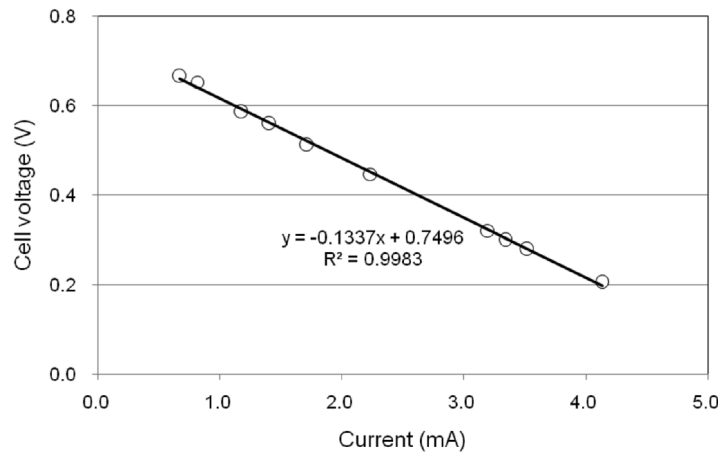


Fig. 5. Estimation of internal resistance from the polarization curves.

내부저항이 약 134 Ω인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 4에서 얻어진 전력밀도 곡선과 일치하는 결과를 보여 준다. 즉, 전력밀도의 최대값이 얻어진 외부저항은 100 Ω인 조건이며 이는 실험된 외부저항 값들에서 MFC 시스템의 내부저항과 가장 가까운 값이다.

쿨롱효율에 미치는 외부저항의 영향을 관찰한 결과를 Table 3 및 Fig. 6에 나타내었다. 각각의 외부저항별로 2회씩 실험한 결과, COD 제거효율은 81.8~91.7%의 범위를 나타내었으며 이때 얻어지는 쿨롱효율은 17.5~46.1%의 범위를 가지는 것으로 나타났다. COD 분석이 각 저항조건별로 안정된 전압값의 5% 수준에서 이루어졌으므로 외부저항에 따른 COD 제거특성에 미치는 외부저항의 영향은 명확하게 규명할 수 없으나 쿨롱효율은 COD 제거와 동시에 전기적 특성이 맞물려 있으므로 그에 미치는 외부저항의 영향을 비교할 수 있다. 쿨롱효율은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 100 Ω의 외부저항에서 최대의 값을 가지는 것으로 나타났다. 현재까지 쿨롱효율 등의 MFC 성능에 미치는 외부저항의 영향에 관해서는 명확한 규명이 이루어져 있지 않은 상태

이다. 쿨롱효율은 미생물에 의한 유기물의 산화로부터 발생하는 전자를 전기에너지로 전환시키는 효율을 의미한다. MFC에서 기질의 산화로부터 발생하는 전자는 전기 생산 외에도 호흡, 발효 등의 과정에 활용될 수 있으므로 쿨롱효율을 높이기 위해서는 시스템의 최적화가 필요하다. 비록 MFC 시스템이 혐기성 미생물에 양호한 열역학적 조건을 유지한다고 하더라도 미생물로부터 전극으로의 전자전달을 감소시키는 다양한 내부저항이 존재한다.<sup>19)</sup> 전기생산에 관여하는 미생물들이 MFC 시스템에서 최대의 활성을 가지게 함으로써 그러한 저항들을 극복할 수 있으며 MFC에서 전기적 성능을 최대로 유도하는 방법은 시스템의 내부저항과 같은 외부저항에서 운전하는 방법이다.<sup>6,20,21)</sup> 본 연구에서 100 Ω의 외부저항에서 최대 쿨롱효율이 얻어진 이유는 시스템의 전기적 성능이 최대인 조건이기 때문인 것으로 판단된다. 즉, MFC 시스템의 내부저항인 134 Ω과 가장 가까운 100 Ω의 외부저항에서 가장 높은 전력밀도가 얻어진 것과 같은 이유로 최대의 쿨롱효율이 얻어진 것으로 판단된다. 그러나 쿨롱효율에 미치는 외부저항의 영향에 관한 명확한

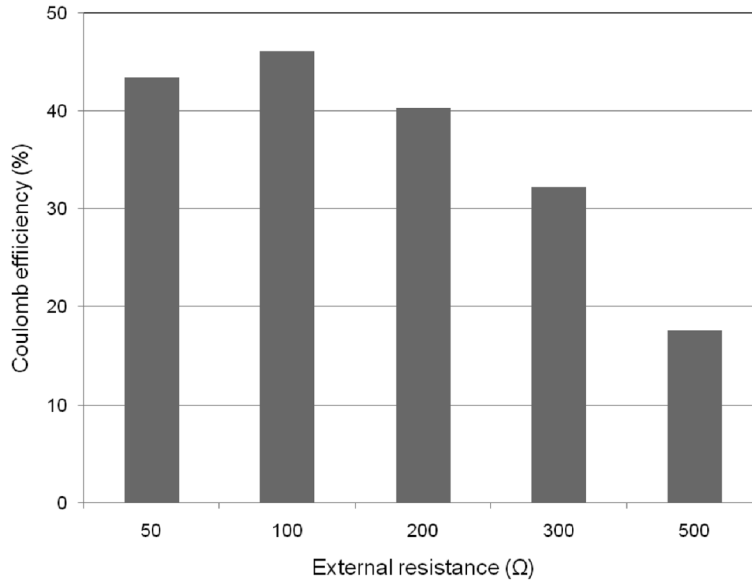


Fig. 6. Effect of external resistance on coulombic efficiency.

Table 3. Coulombic efficiency with variation of external resistance

External resistance [Ω]	Experiment #1		Experiment #2		Average	
	$E_{COD}$	$E_c$	$E_{COD}$	$E_c$	$E_{COD}$	$E_c$
500	94.6	16.1	88.8	18.9	91.7	17.5
300	88.3	29.1	88.0	35.4	88.2	32.3
200	87.2	41.2	91.0	39.4	89.1	40.3
100	87.8	52.1	75.7	47.0	81.8	46.1
50	89.5	43.8	86.5	43.0	88.0	43.4

$E_{COD}$  : COD removal efficiency,  $E_c$  : Coulombic efficiency

구명을 위해서는 30 Ω 이하의 높은 전류밀도 영역에서의 쿨롱효율에 대한 연구와 미생물의 활성에 미치는 외부저항의 영향을 규명하기 위한 추가의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Ferricyanide를 환원제로 사용하는 이형 반응기 MFC 시스템을 구성하여 시스템의 주요 전기적 특성에 미치는 외부저항의 영향을 규명하고자 하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) MFC의 음극 반응기에 미생물을 접종하고 일정한 시간이 경과한 후, 주기적인 기질 공급에 의해 안정적인 전기 생산이 이루어졌으며, 50 Ω의 외부저항 조건에서 0.13~0.16 V 범위의 전압을 얻을 수 있었다.

2) 전류밀도는 실험된 최소 외부저항인 3 Ω 조건에서 1111.11 mA/m<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타났으며 1,000 Ω 조건에서 114.89 mA/m<sup>2</sup>으로 가장 낮게 나타났다. 전력밀도는 일정한 값의 외부저항까지는 급격하게 증가하다가 추가적인 외

부저항의 증가에 따라 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

3) 외부저항을 단계적으로 감소시키며 반복실험을 수행한 결과, 일정한 범위의 전류밀도까지는 전기적 측정값의 편차가 크지 않았으나 높은 전류밀도 영역에서는 실험의 반복에 따른 기질소모로 발생하는 물질전달과 관련된 농도손실의 영향으로 측정값의 변동성이 매우 큰 것으로 나타났다.

4) 전류-전압 곡선을 사용하여 실험된 MFC 시스템의 내부저항을 계산한 결과, 약 134 Ω의 내부저항을 가지는 것으로 나타났으며 내부저항과 가장 가까운 외부저항인 100 Ω에서 가장 높은 전력밀도와 쿨롱효율이 얻어졌다. 이때 얻어지는 전력밀도는 175.8 mW/m<sup>2</sup>이며 쿨롱효율은 46.1%인 것으로 나타났다.

#### 사 사

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호: 20093 020090030)입니다.

KSEE

#### 참고문헌

1. 송영채, 우정희, 유규선, “미생물연료전지의 재료 : 전극 및 분리막, 집전체,” 대한환경공학회지, **31(9)**, 693~704(2009).
2. Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. and Rabaey, K., “Microbial fuel cells : methodology and technology,” *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 5181~5192(2006).
3. Rabaey, K. and Verstraete, W., “Microbial fuel cells : novel biotechnology for energy generation,” *Trends Biotechnol.*,

- 23, 291~298(2005).
- Logan, B. E., "Microbial fuel cells," Wiley-Interscience (2007).
  - Song, Y. C., Yoo, K. S. and Lee S. K., "Surface floating, air cathode, microbial fuel cell with horizontal flow for continuous power production from wastewater," *J. Power Sour.*, **195**, 6478~6482(2010).
  - Logan, B. E. and Regan, J. M., "Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells," *Trends in Microbiol.*, **14**, 512~518(2006).
  - Ringeisen, B. R., Henderson, E., Wu, P. K., Pietron, J., Ray, R., Little, B., Biffinger, J. C. and Jones-Meehan, J. M., "High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP 10," *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 2629~2634(2006).
  - Cheng, S. and Logan, B. E., "Ammonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cells," *Electrochemistry Communications*, **9**, 492~496(2007).
  - Fan, Y., Hu, H. and Liu, H., "Enhanced coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration," *J. Power Sour.*, **171**, 348~354(2007).
  - Rosenbaum, M., Zhao, F., Schroder, U. and Scholz, F., "Interfacing electrocatalysis and biocatalysis with tungsten carbide: A high-performance, noble-metal-free microbial fuel cell," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **455**, 6658~6661(2006).
  - Jang, J. K., Pham, T. H., Chang, I. S., Kang, K. H., Moon, H., Cho, K. S. and Kim, B. H., "Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell," *Pro. Biochem.*, **39**, 1007~1012(2004).
  - 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**, 2281~2285(2004).
  - Cheng, S., Liu, H. and Logan, B. E., "Power densities using different cathode catalysts (Pt and CoTMPP) and polymer binders (Nafion and PTFE) in single chamber microbial fuel cells," *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 364~369(2006).
  - Zhao, F., Harnisch, F., Schroder, U., Scholz, F., Bogdanoff, P. and Herrmann, I., "Application of pyrolyzed iron(II) phthalocyanine and CoTMPP based oxygen reduction catalysts as cathode materials in microbial fuel cells," *Electrochem. Communications*, **17**, 1405~1410(2005).
  - Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S. D., Verhaege, M. and Verstraete, W., "Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer," *Appl. Environ. Microbiol.*, **70**, 5373~5382(2004).
  - Min, B. K., Cheng, S. A. and Logan, B. E., "Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells," *Water Res.*, **39**, 1675~1686(2005).
  - Biffinger, J. C., Ray, R., Little, B. and Ringeisen, B. R., "Diversifying biological fuel cell designs by use of nanoporous filters," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 1444~1449(2007).
  - APHA, AWWA, WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed., Greenberg, A. E., Clesceri, L. S. and Eaton, A. D.(Eds.), pp. 5-6~5-7(1992).
  - Liang, P., Huang, X., Fan, M. Z., Cao, X. X. and Wang, C., "Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **77**, 551~558(2007).
  - Alterman, P., Versichele, M., Marzorati, M., Boon, N. and Verstraete, W., "Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes," *Bioresour. Technol.*, **99**, 8895~8902(2008).
  - Manohar, A. K., Breschger, O., Neelson, K. H. and Mansfeld, F., "The use of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in the evaluation of the electrochemical properties of a microbial fuel cell," *Bioelectrochem.*, **72**, 149~154(2008).