

# 미생물연료전지(MFC)에서 전류차단법(current interrupt technique)을 이용한 활성화전압손실(activation loss)과 저항전압손실(Ohmic loss)의 측정

## Measurement of Activation and Ohmic Losses using a Current Interruption Technique in a Microbial Fuel Cell

박경원\* · 오상은†

Kyung-Won Park\* · Sang-Eun Oh†

강원대학교 자원생물환경학과, \*송실대학교 환경화학공학과

Department of Biological Environment, Kangwon National University

\*Department of Chemical and Environmental Engineering, Soongsil University

(2010년 2월 4일 접수, 2010년 4월 15일 채택)

**ABSTRACT** : Electricity can be directly generated from organic matter even wastewaters using a microbial fuel cell. To achieve high power in MFCs, finding factors decreasing activation and Ohmic losses is very important. In this study we determined activation loss at the anode and cathode and Ohmic loss using the current interruption technique in a H-type MFC. Activation loss at the cathode was four times higher than that of anode activation loss even if Pt-coated carbon (0.5 mg/cm<sup>2</sup>; 10%Pt) was used as the cathode. Ohmic loss determined using current interruption technique (1146 Ω) was almost same as the internal resistance (1167 Ω) measured using AC impedance. The sum of activation losses at the anode and cathode was the same as the value of activation loss of the cell.

**Key Words** : Microbial Fuel Cell, Ohmic loss, Activation Loss, Current interruption Technique

**요약** : 미생물연료전지는 미생물이 유기물을 분해하면서 전기를 발생시킨다. 미생물연료전지는 여러 분야로 응용이 가능하며 현재 생산되는 전력이 낮기 때문에 상용화가 되기 위해서는 미생물연료전지(MFC)의 전력을 증진시키는 방안 연구가 필요하다. 미생물연료전지(MFC)의 전력을 증진시키기 위해서는 산화, 환원전극에서의 활성화전압손실(Activation losses)과 저항전압손실(Ohmic losses)을 줄여야 하며 활성화전압손실과 저항전압손실의 정확한 측정과 이를 줄이기 위한 인자를 찾는 것이 중요하다. 본 연구에서는 H형태의 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC)에서 전류차단법(Current interruption)을 이용하여 산화전극 및 환원전극에서의 활성화 전압손실과 저항전압손실을 측정하였다. H형태의 미생물연료전지에서 백금이 코팅된 전극(0.5 mg/cm<sup>2</sup>; 10% Pt)을 환원전극으로 이용하였음에도 환원전극 전압손실이 산화전극 전압손실보다 4배 가량 큼을 알 수 있었다. 전류차단법(Current interruption)에 의하여 구한 저항전압손실 값(1146 Ω) 과 impedance에 의하여 구한 내부저항(1167 Ω)은 거의 일치하였다. 또한 산화, 환원전극 활성화 전압손실의 합은 전지(cell)의 활성화 전압손실과 일치하였다.

**주제어** : 미생물연료전지, 활성화전압손실, 파워향상, 저항전압손실, 전류차단법

### 1. 서론

일반적으로 미생물연료전지는 유기물 분해로부터 생성된 전자를 mediator 없이 탄소등과 같은 산화전극으로 전달하면서 전기를 발생시킨다.<sup>1~3)</sup> 미생물연료전지는 미생물이 유기물을 산화하는 산화전극(anode)과 산소, 전자, 수소이온이 만나 물로 변환되는 환원전극(cathode)으로 구성된다. 두 개의 전극은 PEM(Proton Permeable Membrane)으로 나누어져 있으며 수소이온은 PEM을 통해 환원전극(cathode)으로 전달되고 전자는 외부 도선을 통해 환원전극

으로 흐르는데 이때 전자의 흐름이 전류이다.<sup>1,2,4)</sup>

일반적으로 미생물연료전지의 성능은 전극에서의 반응속도, 전해질막을 통한 양성자의 이동 및 물질전달 속도 등에 의하여 결정된다.<sup>5)</sup> 산화전극으로 공급된 유기물은 미생물에 의해 산화되면서 전극의 전위의 일정량을 잃음으로써 활성화 에너지를 감소시켜 반응을 원활하게 진행시킨다(활성화 전압손실, activation loss). 또한 접촉저항, 전해질막 저항 등에 의한 전위의 손실을 저항전압손실(Ohmic loss)이라 한다. 산화전극 및 환원전극으로 반응물이 원활히 공급되지 못할 경우 발생하는 손실을 Concentration loss라 한다. 이러

†Corresponding author : E-mail : ohsangeun@kangwon.ac.kr Tel : 033-250-6449 Fax : 033-241-6640

한 요인들에 의해 발생하는 전위의 손실은 미생물연료전지 전체의 성능감소의 원인으로 작용하며 이러한 성능감소요인의 정확한 분석이 반드시 필요하다.<sup>5)</sup>

연료전지(Fuel cell)에서 전극의 overpotential을 측정하는 일반적인 두 가지 방법은 AC impedance 법(Electrical impedance spectroscopy, EIS)과 전류차단법(current interruption)이다. EIS는 교류 시그널을 사용하여 전기화학 셀(전지)의 특성을 분석하는 대표적인 전기화학 분석법으로 전지 및 연료전지 등의 에너지 소자 분야에서 많이 활용되고 있다.<sup>6)</sup> 임피던스는 교류저항을 의미하며 외부조건에 대한 전기화학 반응의 진행을 억제, 혹은 방해하는 정도를 정량적으로 나타낸 값이다. 외부에서 입력된 전기화학 신호의 주파수에 따라 전기화학 시스템 내에서 반응하는 종이 달라지는 특성을 이용하여 기존의 전기화학 실험에서 볼 수 없었던 많은 정보를 얻을 수 있다.<sup>6)</sup>

전류차단법(current interruption)은 연료전지(Fuel cell)에서 내부 저항 및 활성화전압손실을 측정하기 위하여 많이 이용되어 왔다. 원리는 일정량의 전류를 흘려주다가 아주 짧은 시간내에 open circuit으로 바꾸게 되면 전압이 급하게 올라가게 되는데 이 올라간 전압이 Ohmic overpotential에 해당되며  $iR$ -free voltage라고 한다.<sup>5)</sup> 그리고 시간에 따라 서서히 올라가는 전압은 activation overvoltage에 의하여 상승하게 되며 이는 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)에서 모두 고려가 되어야 한다.

본 연구에서는 유리로 제작된 H타입의 미생물연료전지(MFC)에서 전류차단법(current interruption)을 이용하여 저항전압손실을 측정하였고 산화전극(anode)과 환원전극(cathode) 각각에서의 활성화전압손실을 측정하여 비교하였다. AC impedance법을 이용하여 내부저항을 측정하고 전류차단법(current interruption)의 결과와 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 전자공여체와 미생물 배지

본 연구에 사용된 전자공여체(유기물)로는 acetate (sodium acetate)를 사용하였다. 산화전극부에는 K도 소제 하수종말처리장에서 혐기소화슬러지를 채취하여 식용하였으며 유기물이 없는 액체배지는 증류수를 이용하여  $\text{NaHCO}_3$ (3.13 g/L),  $\text{NH}_4\text{Cl}$ (0.31 g/L),  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ (0.75 g/L),  $\text{KCl}$ (0.13 g/L),  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ (4.22 g/L),  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ (2.75 g/L)과 metal 용액(12.5 mL), vitamin 용액(12.5

mL)이 함유되도록 조제하고 NaOH 또는 HCl을 이용하여 pH=7로 만들었다.<sup>7)</sup> 실험은 30°C 항온실에서 실시하였다.

### 2.2. 미생물연료전지(MFC) 제작

미생물 연료전지는 2개의 미디어병(310 mL capacity, Corning Inc. NY) 하단부에 유리로 튜브를 만들고 Fig. 1과 같이 합체하여 구성하였으며 두 종류의 유리 튜브 끝에 고무 게스켓(3.5 cm<sup>2</sup> cross section)을 각각 넣고 그 중간에 PEM (Nafion™ 117, Dupont Co., Delaware)을 삽입하여 클램프 하였다. PEM의 전처리에는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(30%)에 넣어 1시간 동안 끓이고 증류수, 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 증류수 순으로 각각 1시간 끓여 전처리 하였으며 보관은 증류수에 넣어 상온에 보관하였다.

산화전극(anode)으로는 carbon paper (without wet proofing; 2.5 cm×4.0 cm)를 사용하였으며 환원전극(cathode)으로는 carbon paper의 한 면이 Pt로 코팅된 것(0.5 mg/cm<sup>2</sup>; 10% Pt; De Nora North America, Inc.)을 사용하였다. 전극은 구리선으로 연결하고 튜빙(Chemfluor® FEP Tubing; inner diameter: 0.8 mm)을 구리선에 씌우고 carbon paper와 구리선이 부착되는 부분에 epoxy(Dexter Corp. NJ, USA)를 이용하여 구리선이 산화반응조(anode chamber) 안에서 산화 되지 못하도록 덮었다. 구리선과 전극이 제대로 연결되었는지 multimeter를 이용하여 확인하였다. 각 전극은 실험 전 증류수에 하루 가량 담가 두었다가 사용하였다. 구리선이 연결된 산화전극(anode)은 반응조에 맞는 고무마개에 구멍을 뚫어 전극의 전선을 통과 시켜 산화전극 반응조가 외부와 공기의 출입이 없도록 제작하였다.

### 2.3. 미생물연료전지(MFC) 의 운전

산화전극 반응조(anode chamber)에 일정 농도의 전자공여체(electron donor)와 액체 배지를 넣고 질소가스로 10분가량 폭기하면서, 혐기소화슬러지 1 mL를 넣어 산화전극이 삽입된 septum을 미디어병에 끼우고 뚜껑을 닫았다(Fig. 1).



Fig. 1. A H-type MFC used in the study.

환원전극 미디어병에는 같은 미생물 배지를 250mL 넣고 환원전극을 넣었고, 외부 도선으로 산화전극과 환원전극 사이에 1 kΩ 저항을 연결하였다. 그 저항 사이의 생성 전압은 멀티미터(2700, Keithley)를 이용하여 30분 간격으로 연속으로 측정하였으며 Data acquisition system(Model 7700, Keithley Instruments Inc., USA)을 이용 데이터는 컴퓨터 파일에 저장되도록 하였다.

혐기소화슬러지 식종 후 일정 전압이 생성된 후에는 산화전극에 전기활성미생물이 부착이 되었음을 의미하므로 산화전극부의 액체를 모두 버리고 일정농도(5 mM)의 아세테이트와 액체배지를 넣고 같은 방법으로 미생물연료전지(MFC)를 조립 운전하였으며 운전 후 30분 안에 전압 290~300 mV가량이 생성됨을 확인하였다. 전기발생으로 산화전극부의 acetate가 완전히 소모된 후에는 주사기를 이용해 1 M sodium acetate 1~3 mL를 넣었으며 그 때 마다 일정 전압이 일정하게 증가하는 것을 확인하였다.

### 2.4. 분석

생성된 전력은 P=IV로 계산하였으며 여기에서 P(mW)는 전력이며 I(A)는 전류, V(V)는 전압이다. 전력밀도(power density)는 계산된 파워에서 미생물연료전지(MFC)의 산화전극(anode)의 표면적으로 나누어 주어 계산하였다.

각 전극에서의 포텐셜을 측정하기 위하여 Ag/AgCl 표준전극(0.195 V; NHE)을 산화전극 또는 환원전극 미디어 병에 넣어 각각의 포텐셜을 측정하였고 계산식은 다음과 같다.

$$V_{Cell} = V_{Cathode} - V_{Anode}$$

전류차단법(current interruption technique), 내부저항(Internal resistance,  $R_{int}$ ), 전압-전류곡선 및 전력밀도곡선은 IviumStat electrochemical analyzer (IVIUM Technology, The Netherlands)를 사용하였다. 전지(Cell)에 current interruption을 할 경우는 기준전극(reference)을 사용하지 않았으며 산화전극을 potentiostat의 counter와 reference전선에 연결하고 환원전극을 working 전선에 연결하였다. 산화전극에서 활성화전압손실을 측정하고자 할 경우 산화전극을 working, 환원전극을 counter에 연결하였으며, 기준전극(reference electrode)은 산화전극부에 두었다. 환원전극에서 활성화전압손실을 측정하고자 할 경우 산화전극을 counter, 환원전극을 working에 연결하고, 기준전극(reference electrode)은 환원전극부에 두었다. 이때 전극과 기준전극은 최대한 가깝게 위치시켜 voltage loss를 최소

화하였다. 전류차단법(current interruption)방법은 interval time을 0.01초로 하였으며 각 조건에서 일정 전류를 흘려주고 전압이 일정하게 유지가 되면 0 mA로 갑자기 전류를 끊어 주어 전압의 변화를 측정하였다. interval time 0.01초는 MFC에서 저항전압손실을 측정하기에 충분히 작은 sampling time임을 확인하였다.

내부 저항(AC impedance; Electrical impedance spectroscopy, EIS)측정 시는 산화전극을 working electrode로 연결하고 환원전극에 counter와 reference로 연결하였으며 frequency range는 10에서 0.001 Hz로 하고 sinusoidal perturbation 은 10 mV로 하였다.

전압-전류곡선은 chronopotentiometry 를 이용하여 0 mA 부터 0.4 mA 까지 증가시켰으며 각 전류에서 600~1200초 동안 유지시켜 생성 전압이 일정하도록 한 후 다음 단계의 전류로 자동적으로 옮겨 가도록 하였고 이 결과를 바탕으로 전압-전류 곡선을 그렸다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. Polarization curve 및 전류차단법(current interruption)

Polarization curve를 얻기 위하여 미생물연료전지에 여러 단계의 일정 전류를 주면서 각 단계에서 생성되는 전압을 측정하여 그림으로 나타내었다(Fig. 2). Maximum power는 0.3 mA에서 0.08 mW(40 mW/cm<sup>2</sup>)를 보였다. 미생물연료전지에서 활성화전압손실 및 Ohmic loss가 없는 이상적인 전지라면 흘려준 전류와 관계없이 전압은 0.64 V (Open circuit potential)를 유지해야 하지만 여러 원인으로 인한 over voltage 때문에 전류의 흐름이 증가함에 따라 평형 전압은 줄어든다. 전류가 0~0.04 mA까지는 활성화전압손실

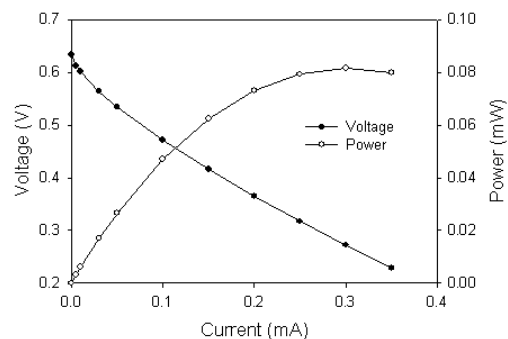


Fig. 2. Polarization curve in a MFC used in this study.

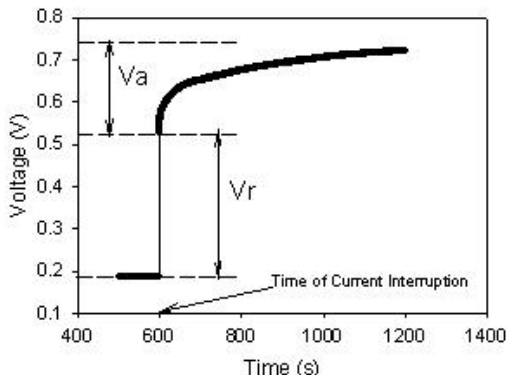


Fig. 3. Voltage changes over time for a H-type MFC after a current interruption. The current of 0.3 mA was imposed to a MFC for 600 s and then current interrupted at 600 s.

(activation loss)가 주를 이루고, 0.35 mA까지는 저항전압 손실이 주를 이루며 그림에서는 나타내지 않았지만 그 후 급격하게 전압이 감소하는 구간은 concentration loss가 주를 이룬다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 미생물연료전지(MFC)에 일정전류를 흘려주다가 순간적으로 전류를 0 mA로 하였을 때(current interrupt)의 전형적인 전압변화를 나타내는 그림이다. 0.3 mA를 미생물연료전지(MFC)에 흐르게 하였을 때는 0.19 V의 평형된 전압이 생성이 되었으며 시간 600초에 순간적으로 전류를 0 mA로 변환시키면 미생물연료전지(MFC)가 open circuit가 되면서 0.19 V에서 0.52 V로 급격하게 전압이 상승하였다. 이는 전해질 및 접촉저항에 의한 저항전압손실에 해당한다 ( $V_r$ ). 600초 이후 0.52 V로부터 서서히 올라가 1200초에 약 0.75 V에서 평형을 이루게 되는데 이는 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)에서의 활성화전압손실에 의한 overpotential이다. 활성화전압손실은 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)에서 동시에 일어나며 이들의 합이 그림의  $V_a$ 에 해당한다.

평형상태의 전압은 미생물연료전지(MFC)에 외부 도선을 따라 전류가 흐를시 산화 및 환원전극에서의 활성화전압손실과 저항전압손실에 의하여 overpotential이 발생되며 그 식은 다음과 같다.<sup>6)</sup>

$$V = E_{OCV} - \eta_{IR} - \eta_a = E_{OCV} - \eta_{IR} - \eta_{an} - \eta_{ca}$$

여기에서  $V$  = 평형 상태에서의 전압,  $E_{OCV}$  = OCV (open circuit voltage),  $\eta_{IR}$  = 전해질 저항,  $\eta_a$  = 활성화전압손실 (activation loss),  $\eta_{an}$  = 산화전극에서의 활성화전압손실 (activation loss at the anode),  $\eta_{ca}$  = 환원전극에서의 활성화전압손실(activation loss at the cathode)이다. 일반적

으로 활성화전압손실은 전극의 표면에서 일어나는 반응의 속도와 관련이 있다. 이 반응의 속도는 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)의 반응을 모두 포함하며 산화전극(anode)에서는 미생물의 활성도 및 종류, 환원전극(cathode)에서는 백금과 같은 촉매의 종류, 조합, 양, 표면적 등과 관련이 있다. 저항전압손실(Ohmic losses)은 미생물연료전지(MFC)의 내부저항(internal resistance)과 깊은 관련이 있다<sup>5,6,8)</sup>. 저항전압손실은 전류가 증가함에 따라 비례하여 전압손실이 커진다. 미생물연료전지(MFC)의 전력생산력을 향상시키기 위해서는 Overpotential 을 줄여야 하며 이를 위해서는 우선 전해질 전압손실 및 산화 환원전극에서의 전압손실을 줄여야 한다. 또한 이를 위하여 미생물연료전지(MFC)에서 각 손실이 얼마나 차지하는지 분석이 필요하다.

### 3.2. 저항전압손실(Ohmic loss) 측정

저항전압손실을 구하기 위하여 그림 3과 같은 방법으로 서로 다른 전류(0.01, 0.05, 0.15, 0.25, 0.3 mA)를 흘려보내면서 각각에 대하여 current interruption을 하고  $V_r$ 를 측정하였다(Fig. 4a). 기울기가 전류차단법(current interruption) 방법에 의해 측정된 내부저항에 해당하며 이는 1,146  $\Omega$ 으로

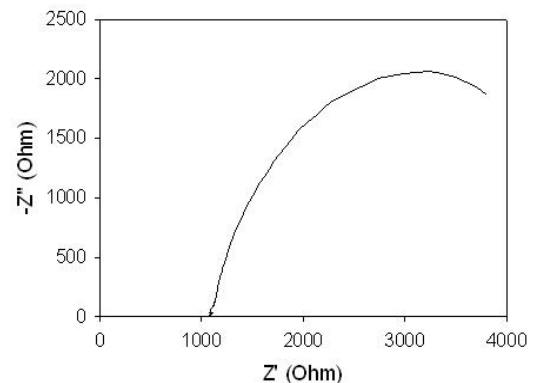
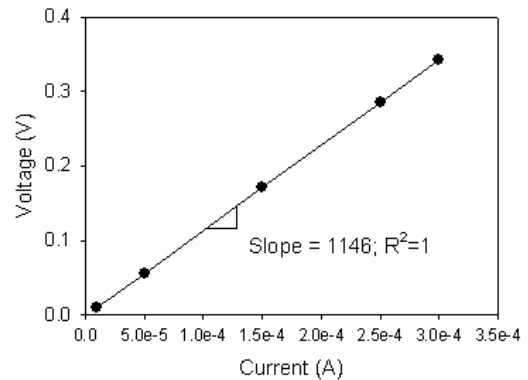


Fig. 4. Internal resistance measurements using (a) a current interruption technique and (b) Impedance method (10 Hz to 0.001 Hz amplitude 0.01 V).

계산되었다. Potentiostat를 이용하여 내부저항(impedance)을 측정한 결과 1167 Ω으로 전류차단법(current interruption) 방법에 의하여 구한 결과와 거의 일치함을 알 수 있다(Fig. 4). Polarization curve에서 ohmic loss 구간에서의 기울기 값은 1,250 Ω으로 impedance 및 전류차단법(current interruption)방법에 의하여 구한 값보다 높았으며 이는 polarization curve에서 저항전압손실이 우세한 구간에 활성화전압손실, concentration loss도 일부 포함되어 있기 때문으로 사료된다.

### 3.3. 산화환원전극에서의 활성화 전압손실(activation loss) 측정

Fig. 3의 전지(cell)의 interruption 시에는 기준전극을 사용하지 않았기 때문에 산화, 환원전극에서의 활성화전압손실을 구하기가 곤란하다. Fig. 3에서의 활성화전압손실(Va)은 산화, 환원전극에서의 전압손실의 합이다. current interruption 방법을 이용하여 산화, 환원전극 각각의 활성화전압손실을 구하기 위하여 산화, 환원전극 각각에 기준전극(reference electrode)을 전극과 최대한 가깝게 위치시키고 실험방법에서 서술한 방법대로 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)에서의 활성화전압손실을 측정하였다.

산화전극에서의 activation loss를 구하기 위하여 미생물연료전지(MFC)의 산화전극과 counter 전극 사이에 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mA의 일정 전류를 흘려주고 400초에서 각각에 대하여 갑자기 산화전극과 counter 전극사이의 전류를 0 mA로 current interrupt를 하면서 생성되는 전압을 측정하였다. 모든 경우에서 기준전극과 산화전극 사이의 전압이 초기 10초 안에 급격하게 올라 갔다가 떨어지면서 안정한 전압이 생성되었다. 전류가 0.01 ~0.6 mA로 증가함에 따라 평형 전압은 -0.48 V에서 -0.45 V로 증가하였다. 시간 400초 후에 갑자기 산화전극과 counter 전극사이의 전류를 0으로 current interrupt를 하게 되면 모든 경우에서 산화전극 전압이 -0.49 V를 유지하였다(그림 5A; 일부 데이터는 그림에 표시하지 않음). 이때 current interruption하기 전 평형 전압과 전류차단(current interruption)후 평형 전압의 차가 anode overvoltage에 해당한다.

환원전극에서의 활성화전압손실을 구하기 위하여 산화전극에서 측정한 방법과 같은 방법으로 환원전극과 counter 전극 사이에 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mA의 일정 전류를 흘려주고 600초 후에 각각에 대하여 순간적으로 환원전극과 counter 전극사이의 전류를 0 mA로 current

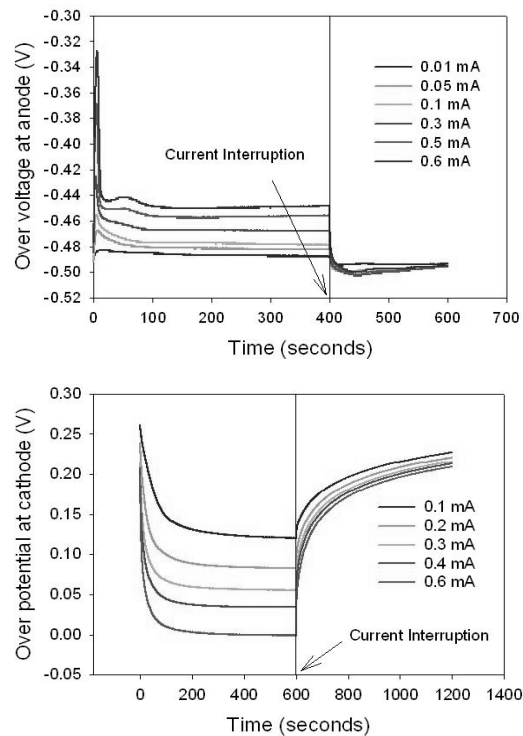


Fig. 5. Current interruption in (A) the anode and (B) the cathode.

interrupt를 하였다. 모든 경우에서 기준전극과 환원전극 사이의 전압이 초기 200초 안에 급격하게 떨어지면서 안정한 전압이 생성되었다. 전류가 0.1~0.6 mA로 증가함에 따라 평형 전압은 0.13 V에서 0.0 V로 감소하였다. 시간 600초 후에 갑자기 산화전극과 counter 전극사이의 전류를 0으로 current interrupt를 하게 되면 모든 경우에서 산화전극 전압이 0.24 V를 유지하였다(Fig. 5b). current interruption 하기 전 평형 전압과 전류차단(current interruption)후 평형 전압의 차가 cathode 에서의 활성화전압손실에 해당한다.

Fig. 5에서 구한 산화전극과 환원전극에서의 활성화전압손실을 Fig. 6에 표시하고 그들의 합을 표시하였다. 또한 전류차단법(current interruption)을 이용하여 전지(cell)의 활성화전압손실을 측정한 결과도 Fig. 6에 표시하였다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 전지(cell)의 활성화전압손실과 산화전극 환원전극에서의 활성화전압손실의 합은 큰 차이 없이 비슷하였다. 본 미생물연료전지(MFC)의 최대 전력을 갖는 0.3 mA에서 환원전극에서의 Va값이 산화전극 Va값보다 4배 이상 크음을 알 수 있다. 이는 미생물연료전지(MFC) 전력 생산력을 향상시키기 위해서는 산화전극의 향상도 중요하지만 환원전극의 활성을 증가시킬 수 있는 새로운 소재의 개발이 중요함을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 미생물연료전지(MFC)는 산화, 환원전극에서의 기작을 보기위해 제작된 H 타입의 반응조이므로 저항전압손실(Ohmic loss)이 1,000~

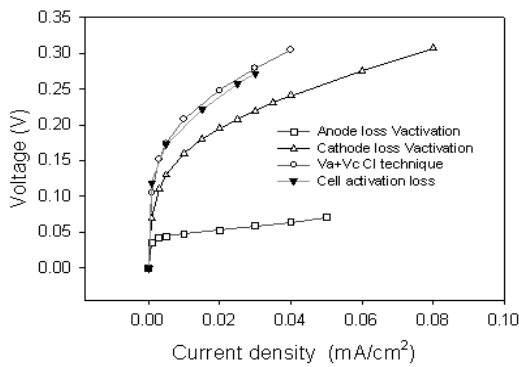


Fig. 6. Activation losses in the anode and cathode in a H-type MFC (electrode surface area= 10 cm<sup>2</sup>).

1,200 Ω으로 상당히 높다. 반응조의 구조에 따라 Ohmic loss는 10~10,000 Ω으로 변하며 일반적으로 저항전압손실(Ohmic loss)은 전극간의 거리, 접촉저항(contact resistance), 전해질 즉 미디어의 전기전도도와 큰 관련이 있으므로 전력 생산을 증진시키기 위해서는 이들 인자들을 고려한 저항전압손실의 감소화가 필요할 것이다.<sup>9~12)</sup>

#### 4. 결론

미생물연료전지는 여러 분야로 응용이 가능하며 현재 생성되는 전력이 낮은 단계에 있기 때문에 상용화가 되기 위해서는 전력을 증진시키는 방안 연구가 필요하다. 이를 위해서는 미생물전지의 활성화 전압손실(activation loss)과 저항전압손실(Ohmic loss)을 최소화 시켜야 한다. 본 연구에서 전류 차단법(current interruption)을 이용하여 산화전극 및 환원전극에서의 활성화 전압손실(activation loss)과 저항전압손실(Ohmic loss)을 측정하였다. 환원전극으로 백금이 코팅된 전극을 이용하였음에도 환원전극 전압손실이 산화전극 전압손실보다 4배 가량 크음을 알 수 있었다. 전류차단법(current interruption)에 의하여 구한 저항전압손실 값과 impedance에 의하여 구한 내부저항이 일치하였다. 산화, 환원전극 전압손실의 합은 전지(cell)의 활성화 전압손실과 일치하였다. 본 논문의 의의는 다음과 같다. 많은 미생물연료전지 연구자들이 미생물의 종류등에 의하여 전력이 많이 변화할 것으로 판단하고 있지만 미생물에 의한 산화전극에서의 활성화전압손실 보다는 저항전압손실, 환원전극에서의 활성화전압손실이 큰 것으로 나타났다. 전기 활성 미생물은 산소, pH, 온도 등 외부 조건만 잘 맞추어 주면 미생물에 의한 활성화전압손실은 다른 전압손실보다 크지 않을 것을 판단된다.

#### 참고문헌

- Kim, H. J., Park, H. S., Hyun, M. S., Chang, I. S., Kim, M., Kim, B. H., "A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*," *Enzyme Microbial Technol.*, **30**(2), 145~152(2002).
- Kim, B. H., Park, D. H., Shin, P. K., Chang, I. S., Kim, H. J., "Mediator-less biofuel cell," *U.S. Patent 5976719*(1999).
- Logan, B. E., "Microbial fuel cells convert corn waste into electricity," *Membrane Technol.*, **9**, 10-10(2006).
- Gil, G.-C., Chang, I.-S., Kim, B. H., Kim, M., Jang, J.-K., Park, H. S., Kim, H. J., "Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell," *Biosens. Bioelectron.*, **18**(4), 327-334(2003).
- Larminie, J., Dicks, A., "Fuel cell systems explained", John Wiley & Sons, Chichester(2000).
- O'Hayre, R., Colella, W., Cha, S.-W., Prinz, F. B., *Fuel Cell Fundamentals*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York(2009).
- Oh, S. E., Min, B., Kim, J., Liu, H., Logan, B. E., "Characterization of design factors affecting power output in a microbial fuelcell," in *Proceedings of the 228th ACS National Meeting*, Philadelphia, ENVR-195(2004).
- Sammes, N., Bove, R., Stahl, K., "Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications," *Curr. Opin. Solid State and Materials Science*, **8**(5), 372-378(2004).
- Oh, S. E., Logan, B. E., "Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells," *Appl. Microbiol., Biotechnol.*, **70**(2), 162-169(2006).
- Min, B., Cheng, S., Logan, B. E., "Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells," *Water Res.*, **39**(9), 1675-1686(2005).
- Cheng, S., Liu, H., Logan, B. E., "Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure," *Electrochem. Communications*, **8**(3), 489-494(2006).
- Jang, J. K., Pham, T. H., Chang, I. S., Kang, K. H., Moon, H., Cho, K. S., Kim, B. H., "Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell," *Proc. Biochem.*, **39**(8), 1007-1012(2004).