

최대전력점추적방법과 외부저항 제어 알고리즘을 이용한 미생물연료 전지의 전력생산 최대화

송영은, 김중래*

Improvement of Power Generation of Microbial Fuel Cells using Maximum Power Point Tracking (MPPT) and Automatic Load Control Algorithm

Young Eun Song and Jung Rae Kim*

접수: 2014년 7월 18일 / 게재승인: 2014년 8월 22일
© 2014 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: A microbial fuel cell (MFC) and bioelectrochemical systems are novel bioprocesses which employ exoelectrogenic biofilm on electrode as a biocatalyst for electricity generation and various useful chemical production. Previous reports show that electrogenic biofilms of MFCs are time varying systems and dynamically interactive with the electrically conductive media (carbon paper as terminal electron acceptor). It has been reported that maximum power point tracking (MPPT) method can automatically control load by algorithm so that increase power generation and columbic efficiency. In this study, we developed logic based control strategy for external load resistance by using LabVIEW™ which increases the power production with using flat-plate MFCs and MPPT circuit board. The flat-plate MFCs inoculated with anaerobic digester sludge were stabilized with fixed external resistance from 1000 Ω to 100 Ω . Automatic load control with MPPT started load from 52 Ω during 120 hours of operation. MPPT control strategy increased approximately 2.7 times of power production and power density (1.95 mW and 13.02 mW/m³) compared to the initial values before application of MPPT (0.72 mW and 4.79 mW/m³).

Keywords: Microbial fuel cell (MFC), Bioelectrochemical system (BES), maximum power point tracking (MPPT), Flat-plate MFC, power density

1. INTRODUCTION

미생물연료전지 (Microbial fuel cell, MFC)는 전기화학적 활성을 가진 미생물을 촉매로 사용하여 하폐수를 포함한 각종 생물학적으로 분해가능한 유기물로부터 전기를 생산하는 새로운 형태의 생물반응기이며 환경친화적인 처리기술과 지속 가능한 바이오에너지생산의 필요성으로 인해 90년대 후반부터 활발히 연구되고 있다 [1-6]. 탄소전극등의 전기전도성을 가진 재료의 표면에 미생물을 부착시켜 유기물을 산화시키면, 세포내부의 대사과정 중 발생하는 잉여전자를 산화전극 (anode)에 전달하고, 수소이온은 이온교환막 또는 분리막을 통해 환원전극(cathode)으로 이동시킨다. 환원전극에서는 외부저항을 통해 이동된 전자와 수소이온 그리고 산소를 물 분자로 환원시키며, 이 과정에서 발생하는 전기화학적 전위차를 이용해 전류의 흐름을 얻게 된다 [7,8].

최근 10여년 동안 미생물연료전지의 최대 전력생산 밀도는 전극재료와 새로운 반응기의 개발 및 미생물촉매의 개량 등을 통해 약 10000배 이상 지속적으로 성장하여 현재 20 L 규모의 반응기에서는 144 W/m³의 전력밀도를 보여주고 있으며 [9], 전극간 거리로 인한 전력손실을 최소화시킨 소규모 MFC 반응기 (30 mL)에서는 2.08 kW/m³로 보고되고 있다

부산대학교 화공생명공학부
School of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea
Tel: +82-51-510-2393, Fax: +82-51-510-3943
e-mail: j.kim@pusan.ac.kr

[10]. 생물전기화학반응기는 화학연료전지의 고가 금속 촉매를 친환경적이고 재생가능한 미생물촉매로 전부 또는 일부 대체 가능하기 때문에 최근 많은 각광을 받고 있다.

미생물이 전극과 상호작용하여 호흡작용에서 발생한 전자를 외부의 전자수용체 (전극)와 교환하는 기작은 80년대 후반 철이나 망간의 생물학적 산화환원작용에 대한 연구를 시작으로, 박테리아의 산화 및 환원반응을 이용해 전기와 수소 생산 및 바이오센서, 해수담수화와 자원회수공정 등에 활발히 적용되고 있다 [11-14]. 에너지회수 하폐수처리시스템을 비롯한 기존 생물 및 환경기술과 전기화학공정의 융합을 통해 다양한 기술이 시도되고 있으며 최근 각종 유용화학물질의 생산에 이용되는 생물전기화학반응기 (bioelectrochemical system, BES)로 응용범위가 확장되고 있다 [15,16].

MFC의 미생물촉매는 전기화학적으로 활성을 가지는 미생물막 (electrogenic biofilm)을 전극상에 형성하며, 전극을 최종 전자수용체로 사용하는 동시에 세포내의 대사반응이 전극과 영향을 주고 받는 동적인 특성을 가진다. 따라서 전극에 인가되는 전압이나 전류 등 전극 운전조건의 제어를 통해 전극상 미생물막의 성능 개선이 가능하며, 이를 통해 전체 시스템의 전력밀도 개선과 안정성 향상이 가능할 것으로 예상된다. 기존의 MFC 시스템은 이러한 동적인 미생물촉매의 특성을 살리지 못하는 고정저항 (fixed resistance)을 사용해 운전 및 성능테스트를 수행해 왔으나, 최근 최대전력점추적 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 방법과 전압 모니터링 및 제어보드를 이용해 최적점 (전력생산)을 실시간으로 찾아 시스템의 성능을 최적화하는 연구가 활발히 진행되고 있다 [17-19]. MPPT는 산화전극과 환원전극의 전위차와 전류흐름을 자동으로 제어하는 가변저항을 사용함으로써 전극-미생물 하이브리드 시스템을 쌍방향으로 제어할 수 있으므로 산화전극에 형성된 미생물막이 전력생산을 위한 최적의 조건에서 운전될 수 있도록 한다.

Premier et al. (2009)은 기존 태양전지셀에 적용되는 MPPT 알고리즘을 미생물연료전지에 적합하게 변형하여 가변저항을 이용한 MFC용 MPPT를 개발하였다. 회분식 two-chamber MFC를 이용해 실험한 결과 MPPT 가변저항으로 운전한 경우 기존의 고정저항으로 운전된 MFC에 비해 약 5배 높은 전자회수율과 전력밀도를 얻었으며, 미생물군집 분석을 통해 MPPT 알고리즘이 전극상 미생물막의 형성과 성장변화에 영향을 미치고 있음을 보여주었다 [19]. Boghani et al.은 후속 연구를 통해 MPPT에 부가전압을 추가하여 전극에 인가한 경우 전기화학적 활성미생물의 산화전극 부착속도 및 전기생산을 촉진할 수 있음을 보여주었다 [17]. Park et al.은 미생물연료전지의 낮은 전력생산 성능을 극복하기 위하여 MPPT 알고리즘과 축전시스템을 결합한 MPPC (Maximum Power Point Circuit)를 이용하여 최대 2.9 V와 76.8 J의 에너지를 얻을 수 있음을 보여주었다 [20].

미생물연료전지에 MPPT를 적용한 기존의 연구는 대부분 스케일업이 불가능한 소규모 반응기에서 회분식으로 운전하여 연구를 수행하였으며, 스케일업이 가능한 미생물연료전

지 반응기에 연속식으로 운전하며 MPPT의 영향을 분석하는 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 미생물연료전지에 적합한 최대전력점추적 (MPPT) 알고리즘과 제어보드를 제작하였다. 이를 산화전극과 환원전극의 간격을 2 mm 이하로 줄인 판형미생물연료전지 반응기 (Flat plate MFC)에 적용하여 연속식으로 운전하며 MPPT의 영향과 전력밀도 향상에 관해 조사하였다. 본 연구를 통하여 MPPT알고리즘과 제어보드가 생물전기화학반응기의 전극상미생물 촉매를 실시간으로 제어하고 성능을 최대화 할 수 있는 가능성을 조사하였다.

2. RESULTS AND METHODS

2.1. 판형미생물연료전지 (Flat-plate MFC) 구성 및 전극 조성

MFC는 총 부피 150 mL이며 환원전극, 산화전극, 분리막이 결합된 셀이 서로 마주보고 부착되어 있는 병렬형 구조로 이루어져 있다 (Fig. 1a and b). 반응기의 두 개의 셀은 서로 유입수를 공유하여 사용하는 형태이며, 유입수가 들어오는 칸막이 부분을 기점으로 산화전극, 분리막, 공기환원전극 (each size: 150×200 mm) 순서로 구성되어 있다. 반응기는 아크릴로 제작된 프레임과 가스켓을 나사로 고정하였고, 셀 내부의 두 전극 (산화전극과 환원전극)과 분리막의 간격은 2 mm 이하이다. 전기화학적 활성을 가진 미생물막 부착을 위한 산화전극은 탄소천 (Carbon Felt, NARA cell-Tech Co., Korea)을 사용하였고, 환원전극은 Carbon Cloth (NARA cell-Tech Co., Korea)에 PTFE (Polytetrafluoroethylene)를 이용하여, 4겹의 Diffusion layer을 도포하였으며, Nafion solution (DE521, NARA cell-Tech Co., Korea)을 결합제로 사용하여 탄소천 표면에 백금촉매 (0.5 mg Pt/cm²; liquid side)를 도포하였다 [1]. (Fig. 1a)

2.2. 최대전력점추적 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 알고리즘 및 제어보드 제작

MPPT 방법은 주로 날씨나 기후에 따라 광량이 급변하는 태양광 발전에서 최대전력생산 조건을 찾기 위해 사용되어왔으며, 그에 따른 알고리즘의 개발이 이루어져 왔다 [21]. 태양광발전에서 적용되는 MPPT 알고리즘은 크게 두 가지로 최고전력을 얻을 때까지 전압 또는 전류에 변화를 준 후 전력의 출력이 감소하는 구간을 검색하여 최대값을 유지할 수 있도록 전압 또는 전류를 제어하는 방식인 Perturb and Observe (P&O)과, 최고 전력 지점에서 전력과 전압 미분값의 기울기가 0이 되도록 하여 최대값을 유지할 수 있도록 하는 Incremental and Conductance (I&C) MPPT가 알려져 있다 [22]. 본 연구에서는 I&C MPPT 방식을 변용하여 MFC 운전에서 적합하게 알고리즘을 수정하였다 (Fig. 2a). MPPT 알고리즘 구현을 위해 LabVIEW™ (National Instruments™, USA) 소프트웨어를 사용하였으며, 모니터링 및 제어를 위해 NI USB-6009

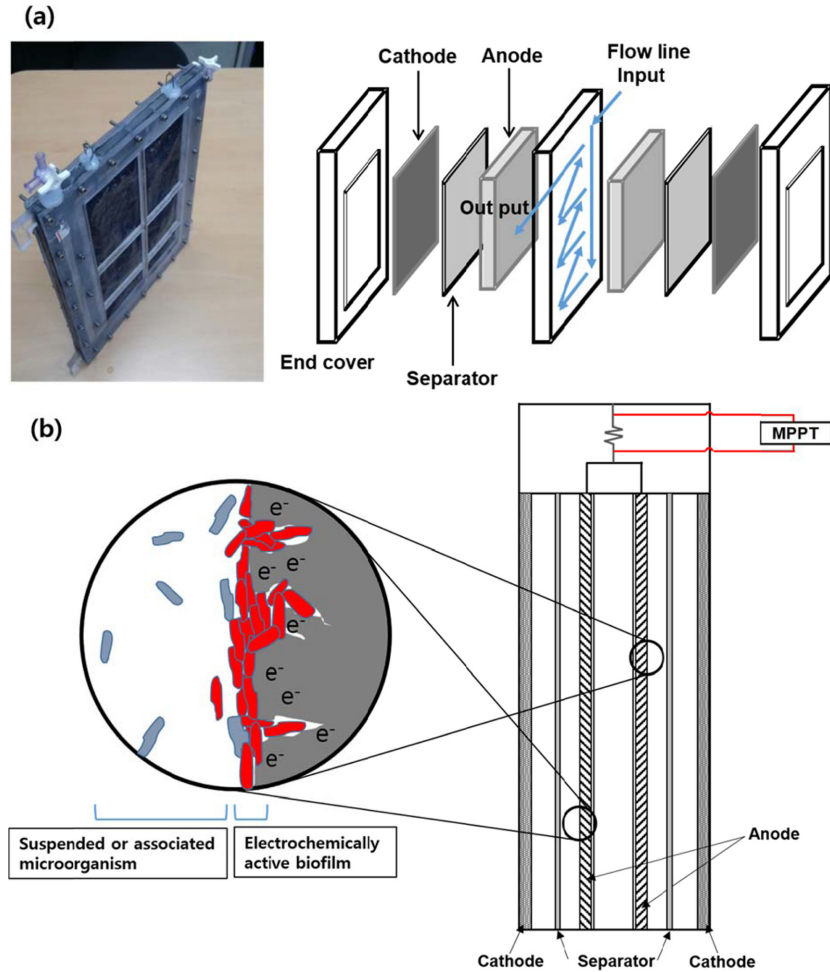


Fig. 1. Schematic diagram of Flat-plate MFC structure as described in the Material and method section (a), and electrochemically active biofilm on the electrode (b).

(National Instruments™, USA)와 디지털 신호를 이용한 저항 제어보드로 MPPT 제어박스를 제작하였다 (Fig. 3). 자동 저항제어보드는 전기적 신호로 조작되는 가변저항 IC 칩 X9C 102과 전력 계전기 (Power MOSFET Relay) PVN012 제품으로 MPPT의 제어 보드를 구성하였고 NI USB-6009를 통해 신호의 수집 및 전달할 수 있는 알고리즘 설계 및 Block diagram을 디자인 제작하였다. 디자인의 구성은 data acquisition (DAQ) card를 통하여 입력된 전압과 저항을 측정하여 전력을 계산하고, 이전 측정데이터와 비교하여, 알고리즘에 의해 저항을 조절하며 최적점을 추적하는 방식으로 설계되었다. MPPT 제어장치는 총 4개의 채널을 설치하였고, 그 중 2개는 MFC의 전압을 측정하여 MPPT를 적용 및 저항을 조절하여 최대 전력점을 추적하는 채널이며, 나머지 2채널은 MFC의 전압 측정 및 모니터링만 가능한 채널로 제작되었다 (Fig. 3).

2.4. 미생물 접종 및 순치

반응기 내부의 산화전극 표면에 전기화학적으로 활성을 가지는 미생물막의 형성을 위해 2차 소화슬러지 (수영하수처

리장, 부산)와 배지를 1:10의 비율로 혼합하여 평판형 미생물 연료전지에 접종한 후 7일간 회분식으로 운전하며 안정화시켰다. 산화전극과 환원전극은 고정저항 1000 Ω을 사용하여 연결하였다. 이때 사용된 배지의 조성은 50 mM의 phosphate buffer (pH 7.0) 및 CH₃COO·Na; 3.28 g/L, NH₄Cl; 0.23 g/L, NaCl; 0.04 g/L, MgSO₄·H₂O; 0.01 g/L, KCl; 0.02 g/L, Yeast Extract; 0.01 g/L를 포함하였다. 반응기는 상온 (25~30°C)에서 운전하였으며, 초기 측정된 전압이 10 mV로 측정되었으며, 약 7일 간의 순치과정이 끝나고 연속운전으로 전환하였다.

2.5. Flat-plate MFC-MPPT Operation

순치과정이 끝난 후 peristaltic pump (77521-50, Master Flex, USA)를 이용해 합성배지를 연속적으로 공급하였다. 합성배지의 유속은 Hydraulic Retention Time (HRT) 기준 1시간으로 설정하여 운전하였으며, 전압 생산량은 LabVIEW™를 이용하여 지속적으로 관찰하였다. 높은 전압 생산량이 유지될 때 마다 고정저항 1000 Ω에서 100 Ω까지 순차적으로 낮추어 안

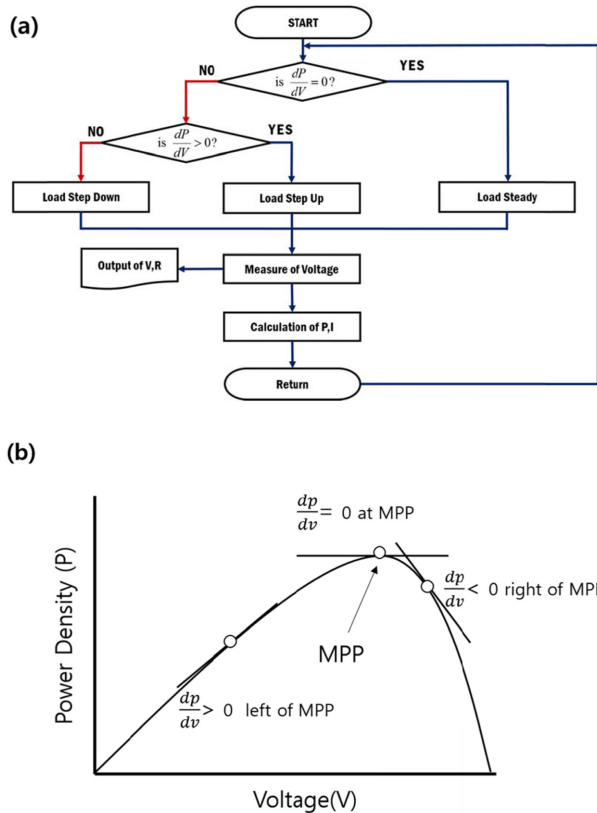


Fig. 2. The algorithm of maximum power point tracking method (MPPT) for microbial fuel cell operation (a), Tracking of maximum power point (MPP) according to algorithm on power density curve in MFC (b).

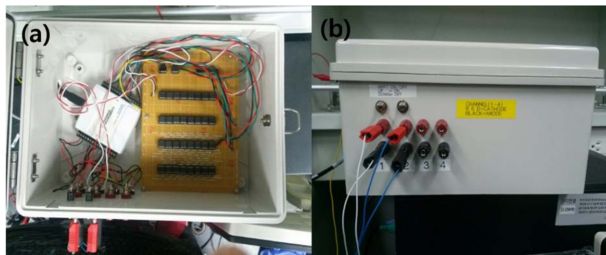


Fig. 3. The MPPT control system box used in this study (a), Internal circuit board and DAQ system box, and external connector to the anode and cathode of MFC (1st and 2nd channel were used for MPPT control, and 3rd and 4th channel were used for MFC voltage monitoring) (b).

정확을 시켰다 (Fig. 4a). 100 Ω의 고정저항에서 안정화된 평판형 MFC에서 외부고정저항을 제거한 후, 제작된 MPPT 제어보드를 연결하여 LabVIEW™의 Front panel에서 1분 간격의 샘플링 시간과 초기 가변저항을 52.4 Ω으로 설정하여 MPPT 운전을 시작하였다. 가변저항 값은 전력-전압의 미분값이 양일 경우 저항을 상승시켜 (전압을 상승시킴) 오른쪽으로 이동시키고, 미분값이 음일 경우 저항을 하락시키면서

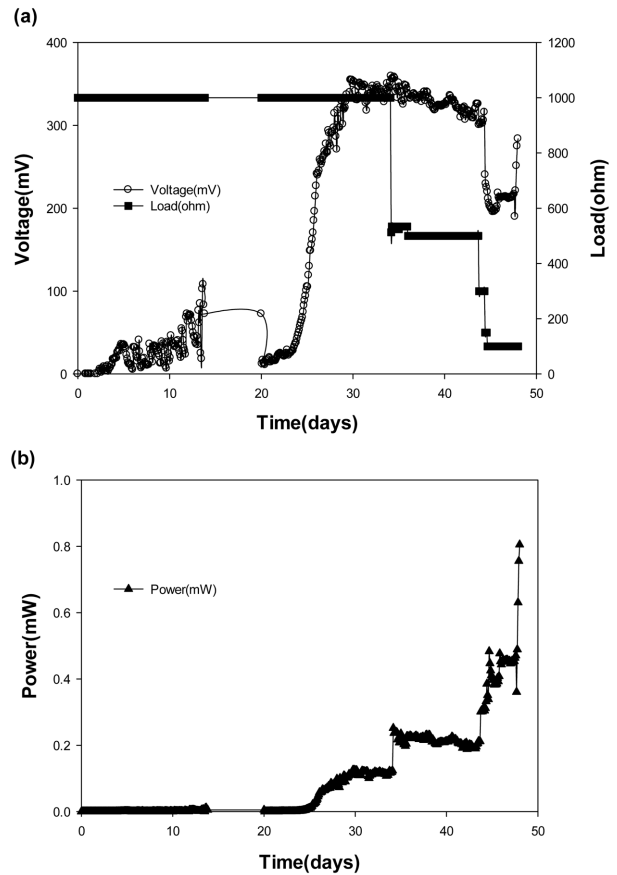


Fig. 4. Stabilization of Flat-plate MFC after inoculation with digester sludge using fixed resistances; (a) Voltage and Load, (b) Power density development as the electrogenic biofilm attached on the electrode surface.

(전압을 강하시킴) 최대전력점을 지속적으로 추적하였다. MFC의 발생전압과 MPPT 운전에 미치는 온도의 영향을 분석하기 위해 온도 센서 (TC-01, J-Type, National Instrument™, USA)를 추가 설치하여 온도의 변화를 시간에 따라 모니터링 하였다.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. 고정저항을 이용한 평판형 MFC의 전력생산

슬러지로 접종한 평판형 MFC를 고정 저항 (1000 Ω)을 연결한 후 HRT 1시간으로 연속 운전하였다 (Fig. 4a). 접종 후 20 일까지 100 mV 이하의 낮은 전압을 보이며 지속적으로 상승하였으며, 이후 360 mV까지 급격히 상승하였다 (0.13 mW). 1000 Ω의 고정저항에서 전극을 최종전자수용체로 이용하는 미생물의 지속적인 부착으로 인해 전력이 발생하고 있음을 보여준다. 36일 이후 고정저항을 500 Ω으로 낮추고, 이후 10 일간 더 운전하였으나 전압의 뚜렷한 하락은 관찰되지 않았다. 이는 저항을 500 Ω으로 낮추었을 때 전력값이 약 0.26

mW로 두 배 상승하였음을 나타내며, 전극상 미생물의 순치 및 부착량 증가로 인해 지속적인 성능향상이 이루어지고 있음을 의미한다. 만약 1000 Ω의 고정저항을 계속 사용하였을 경우, 이러한 성능향상을 파악하기 어려우며, 따라서 최적의 전력생산을 위한 운전조건을 부가하기 어렵다.

이후 저항을 500 Ω, 300 Ω, 150 Ω 그리고 100 Ω까지 단계적으로 낮추며 전압의 변화를 조사하였다. 300 Ω에서 MFC 전압이 약 200 mV까지 하락하였으며, 이후 150 Ω과 100 Ω까지 낮추어도 전압은 약 200 mV 내외를 유지하는 것을 볼 수 있었다. 이는 전극상 미생물막이 저항의 변화에 대해 적응하며 전기생산 성능을 동적으로 조절함을 보여준다. 약 48일 간의 고정저항 MFC운전을 통해 최종적으로 얻어진 전력값은 0.8 mW로서 저항을 지속적으로 낮춤으로써 연속운전 초기에 비해 약 6배 가량 성능이 향상되었다.

3.2. 최대전력점 추적방법 (MPPT)을 이용한 평판형 MFC의 전력생산 최대화

외부고정저항 100 Ω로 MFC를 안정화시킨 후 고정 저항을 제거하고, MPPT Circuit board를 연결시켜 최대전력점추적 알고리즘을 적용하였다 (Fig. 5). 가변저항의 초기값을 52.4 Ω으로 설정하고, 샘플링 타임 즉 알고리즘의 반복시간을 1분으로 설정한 후, 평판형 MFC를 운전하였다. 그 결과 전압은 약 190 mV에서 안정화되었고, 저항 값은 10~500 Ω 범위 내에서 MPPT 알고리즘에 의해 최대 전력값을 얻도록 자동으로 제어되었다.

MPPT 운전 3일 이후 저항이 점차 감소하였고, 이때 MFC의 전압은 변화가 없었다. 따라서 전력은 급격히 상승하여 운전 5일 후 약 2.0 mW에 달하였다. 이는 적용된 MPPT 알고리즘이 최대전력점을 추적하기 위하여 전압을 인가하거나 전류를 인가하는 방식이 아닌 저항만을 가변적으로 조절하여 최대전력점을 찾는 알고리즘을 기반으로 하고 있으므로, MFC의 내부 저항을 낮추는 방향으로 시스템을 유도해 결과적으로 전력을 증가시키게 된 것으로 판단된다. 즉 MPPT 운전 중 미생물의 전극 부착 및 대사활동 증가로 인해, 전극으로 전자 전달 성능이 향상되었으며, 이때 저항을 낮추어도 출력 전압 값은 유지가 되므로 전력값이 계속 상승하는 방향으로 진행이 되었다.

지속적인 전력의 상승구간 이후에 전력이 급격히 하락하는 구간을 발견할 수 있는데 (day 5), 이는 연속 운전시 반응기 내부로 공기유입, 정기적인 펌프와 튜브의 세척으로 인한 환경변화, 반응기 내부 가스의 축적등으로 인한 비정상 운전이 원인으로 추정된다. 즉 MPPT로 인해 최적점 근처에서 운전

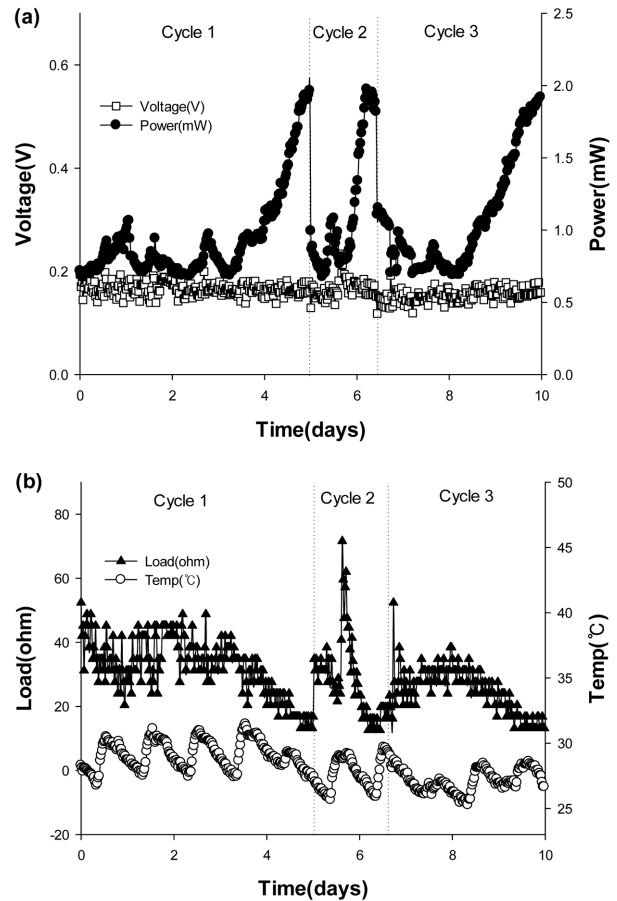


Fig. 5. Power density and operating parameter development of MFC at each stages of MPPT control. (a) Power density and voltage according to operating time, (b) Load and Temperature according to time.

되었을 경우 연속 운전시 정상상태에서 벗어난 외부요인에 의해 매우 민감하게 반응하여 시스템의 성능이 다시 초기 상태 (0.7 mW)로 돌아가는 것을 볼 수 있다. 따라서 MPPT 시스템의 민감도를 줄이거나 전압을 제어하는 알고리즘의 개발 등 추가적인 작업이 필요할 것으로 판단된다.

초기 시스템의 운전에서 가변저항 52.4 Ω을 인가하여, 3번의 사이클 실험을 반복한 결과, Table 1과 같은 전압과 저항 및 전력값을 얻을 수 있었다. 전체적인 시스템에서 전압은 초기 전압 0.194 V보다 떨어지는 결과가 나타났으나, 저항 또한 초기의 설정값보다 낮은 방향으로 유도되는 양상을 볼 수 있다. Table 1은 각 사이클의 초기 전압, 전력 및 전력밀도를 보

Table 1. Power generation of Flat-plate MFC with Maximum power point tracking (MPPT) operation at each cycle

	Voltage (V)	Final adjusted Load (ohm, Ω)	Power production (mW)	Volumetric Power density (W/m ³)
Initial	0.194	52.4	0.72	4.79
Cycle 1	0.166	13.2	1.97	13.11
Cycle 2	0.157	12.6	1.95	13.02
Cycle 3	0.159	13.2	1.92	12.79

여준다. 각 MPPT 운전 사이클은 1.97 mW (13.11 W/m³), 1.95 mW (13.02 W/m³), 1.92 mW (12.79 W/m³)의 전력 및 전력밀도를 보여주었고, 이는 초기값 (0.72 mW 및 4.79 mW/m³) 보다 약 2.7배 상승하는 결과를 얻을 수 있었다 (Table 1 and Fig. 5).

전극상 미생물을 촉매로 전기화학 반응을 수행하는 생물전기화학반응기는 전기에너지의 생산, 지속가능한 하폐수처리, 바이오센서, 해수담수화 등에 폭넓게 적용 가능성이 연구되고 있다. 전극에 전자를 전달하는 전기화학적 활성 미생물은 전극을 최종전자수용체로 사용함과 동시에, 전극으로 인가되는 제어인자를 적극적으로 활용하여 미생물막의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구는 이러한 미생물막의 직접적인 제어 방법의 하나로서 MPPT 가변저항을 사용하였고, 이를 구현하기 위한 LabVIEW™ 제어 알고리즘과 제어 보드를 제작하여 평판형 MFC에서 향상된 전력값을 얻을 수 있었다. 또한 전기적인 제어가 미생물막의 직접적인 제어인자가 될 수 있음을 확인하였고, 제어 알고리즘의 개선, 제어 보드의 가변저항 미세조정 등 향후 개선작업을 통해 미생물연료전지 및 생물전기화학반응기에서 향상된 성능을 얻을 수 있을 것으로 전망된다.

4. CONCLUSION

본 연구에서 MPPT 시스템은 산화전극과 환원전극의 전위차에 최적의 저항을 알고리즘을 통하여 자동적으로 찾아서, 동적으로 제어해 줌으로써 최대의 전력을 얻을 수 있었다. 평판형 MFC를 연속식으로 운전하고 MPPT 알고리즘을 통해 저항을 자동 제어함으로써 초기 저항 52.4 Ω에서 13.2 Ω와 12.6 Ω 그리고 13.2 Ω까지 하락하였고, 세 번의 cycle 실험을 통하여 초기 4.79 W/m³에서 출발하여 각각 13.11 W/m³와 13.02 W/m³ 그리고 12.79 W/m³의 상승된 전력밀도를 얻을 수 있었다.

Acknowledgements

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의해 연구되었습니다.

REFERENCES

- Cheng, S., Liu, H. and Logan, B. E. (2006) Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochem. Comm.* 8: 489-494.
- Berk, R. S. and Canfield, J. H. (1964) Bioelectrochemical energy conversion. *Appl. Microbiol.* 12: 10-12.
- Rao, J., Richter, G., Von Sturm, F. and Weidlich, E. (1976) The performance of glucose electrodes and the characteristics of different biofuel cell constructions. *Bioelectrochem. Bioenerget.* 3: 139-150.
- Davis, J. B. and Yarbrough, H. F. (1962) Preliminary experiments on a microbial fuel cell. *Science.* 137: 615-616.
- Cohen, B. (1931) The bacterial culture as an electrical half-cell. *J. Bacteriol.* 21: 18-19.
- Potter, M. C. (1911) Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character.* 84: 260-276.
- Logan, B. E. (2009) Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nat Rev Micro.* 7: 375-381.
- Rabaey, K., Lissens, G. and Verstraete, W. (2005) "Microbial fuel cells: Performances and perspectives" in *Biofuels for Fuel Cells: Biomass Fermentation Towards Usage in Fuel Cells*, ed. London: IWA Publishing.
- Dekker, A., Heijne, A. T., Saakes, M., Hamelers, H. V. M., and Buisman, C. J. N. (2009) Analysis and Improvement of a Scaled-Up and Stacked Microbial Fuel Cell. *Environ. Sci. Technol.* 43: 9038-9042.
- Fan, Y., Han, S. K., and Liu, H. (2012) Improved performance of CEA microbial fuel cells with increased reactor size. *Energy Environ. Sci.* 5: 8273-8280.
- Chen, M., Zhang, F., Zhang, Y., and Zeng, R. J. (2013) Alkali production from bipolar membrane electro dialysis powered by microbial fuel cell and application for biogas upgrading. *Appl. Energy.* 103: 428-434.
- Kim, Y. and Logan, B. E. (2011) Series Assembly of Microbial Desalination Cells Containing Stacked Electro dialysis Cells for Partial or Complete Seawater Desalination. *Environ. Sci. Technol.* 45: 5840-5845.
- Chang, I. S., Jang, J. K., Gil, G. C., Kim, M., Kim, H. J., Cho, B. W., and Kim, B. H. (2004) Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor. *Biosens. Bioelectron.* 19: 607-613.
- Kaur, A., Kim, J. R., Michie, I., Dinsdale, R. M., Guwy, A. J., and Premier, G. C. (2013) Microbial fuel cell type biosensor for specific volatile fatty acids using acclimated bacterial communities. *Biosens. Bioelectron.* Accepted.
- Nevin, K. P., Woodard, T. L., Franks, A. E., Summers, Z. M., and Lovley, D. R. (2010) Microbial Electrosynthesis: Feeding Microbes Electricity To Convert Carbon Dioxide and Water to Multicarbon Extracellular Organic Compounds. *Mbio.* 1.
- Rabaey, K. and Rozendal, R. A. (2010) Microbial electrosynthesis - revisiting the electrical route for microbial production. *Nat. Rev. Microbiol.* 8: 706-716.
- Boghani, H. C., Kim, J. R., Dinsdale, R. M., Guwy, A. J., and Premier, G. C. (2013) Control of power sourced from a microbial fuel cell reduces its start-up time and increases bioelectrochemical activity. *Bioresour. Technol.* 140: 277-285.
- Woodward, L., Tartakovsky, B., Perrier, M., and Srinivasan, B. (2009) Maximizing power production in a stack of microbial fuel cells using multiunit optimization method. *Biotechnol. Prog.* 25: 676-682.
- Premier, G. C., Kim, J. R., Michie, I., Dinsdale, R. M., and Guwy, A. J. (2011) Automatic control of load increases power and effi-

- ciency in a microbial fuel cell. *J. Power Sources*. 196: 2013-2019.
20. Wang, H., Park, J. D., and Ren, Z. (2012) Active energy harvesting from microbial fuel cells at the maximum power point without using resistors. *Environ. Sci. Technol.* 46: 5247-5252.
21. Dolara, A., Faranda, R., and Leva, S. (2009) Energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems. *J. Electromagnet. Anal. Appl.* 1: 152-162.
22. Safari, A. and Mekhilef, S. (2011) Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using Cuk converter. *Ind. Electronic. IEEE Transac.* 58: 1154-1161.