



## 미생물 연료전지 영속발전 지표개발

송하근, 구자공<sup>†</sup>

중원대학교 신재생에너지자원학과

(2015년 6월 12일 접수, 2015년 6월 24일 수정, 2015년 6월 25일 채택)

## Sustainability Indices (=Green Star) for Microbial Fuel Cell

Ha-Geun Song, Ja-Kong KOO<sup>†</sup>

Department of Renewable Energy Engineering, Jungwon University, Goesan-eup, Goesan-gun, Chungbuk, Korea

### ABSTRACT

A microbial fuel cell (MFC) is a device that can be obtained electricity from a variety of organic through the catalytic reaction of the microorganism. The MFC can be applied to various fields, and research is required to promote the performance of the microbial fuel cell for commercialization. The lower performance of an MFC is due to oxygen reduction at the cathode and the longer time of microbial degradation at anode. The MFC amount of power is sufficient but, in consideration of many factors, as a renewable energy, now commonly power density as compared to Nafion117 it is an ion exchange membrane used is PP (Poly Propylene) from 80 to about 11 fold higher, while reducing the cost to process wastewater is changed to a microporous non-woven fabric of a low cost, it may be energy-friendly environment to generate electricity. All waste, in that it can act as a bait for microorganisms, sustainability of the microbial fuel cell is limitless. The latest research on the optimization and performance of the operating parameters are surveyed and through the SSaM-GG(Smart, Shared, and Mutual- Green Growth) or GG-SSaM(Green Growth - Smart, Shared, and Mutual) as the concept of sustainable development in MFC, the middle indices are developed in this study.

Keywords : Microbial fuel cells, PP ion exchange membrane, Green Star, GG-SSaM, Sustainable development indices

<sup>†</sup>Corresponding author(koo@jwu.ac.kr)

초 록

미생물연료전지(MFC)는 미생물의 촉매 반응을 통해 다양한 유기물로부터 전기를 얻을 수 있는 장치이다. MFC는 여러 분야로 응용이 가능하며 현재 생산되는 전력이 낮기 때문에 상용화가 되기 위해서는 미생물연료전지의 성능을 증진시키는 연구가 필요하다. 현재 연료전지에 비해 MFC의 성능이 낮은 이유는 미생물 분해시간이 오래 걸린다는 점과 음극에서 산소 환원의 과정에서 과전압이 상당히 높기 때문이다. MFC는 전력량이 미흡하지만 많은 요인들을 고려하면 신재생에너지로서 현재 일반적으로 사용하고 있는 이온교환막인 Nafion 117 대비 전력밀도가 PP(Poly Propylene) 80에서 약 11배 높은 저비용의 미세 다공성 부직포로 변경하여 하·폐수를 처리하는데 드는 비용을 절감시키면서 전력을 발생시키는 친환경적인 에너지원이 될 수 있을 것이다. 모든 폐기물은 미생물의 먹이로 작용할 수 있다는 점에서 미생물 연료 전지의 지속가능성은 무한하다. 본 논문에서는 미생물연료전지의 구성, 운전 매개변수의 최적화 및 성능에 대한 최근 연구를 고찰하고 SSaM-GG(Smart, Shared, and Mutual-Green Growth) 또는 GG-SSaM=(Green Growth - Smart, Shared, and Mutual)라는 개념을 통하여 MFC의 지속가능한 발전에 대한 중간지표들을 개발하고자하는 바이다.

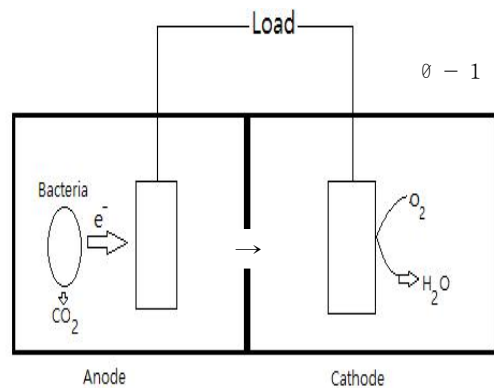
주제어 : 미생물연료전지, PP이온교환막, Green Star, GG-SSaM, 영속발전지표

1. 서론

미생물연료전지 기술은 유망한 기술이면서 끝없는 도전 과제를 던져주는 기술로 최근 알려지고 있다. 최근 우리에게 발생한 문제 중 하나는 재생에너지의 이용이며, 환경오염물질의 배출로 인해 환경파괴 문제와 에너지 부족 문제를 해결하기 위한 핵심기술로 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell; MFC)를 꼽을 수 있다. MFC는 유기물에 함유된 화학에너지를 미생물의 촉매작용을 이용하여 전기에너지로 전환시키는 장치이다. 또한 하·폐수를 처리함과 동시에 전기에너지를 회수할 수 있는 그린기술이다.

MFC는 일반적인 화학연료전지와 유사하게 산화전극조와 환원전극조로 나누어지며, 전극 사이에는 이온교환막이 있다. 화학연료전지의 한 종류인 수소연료전지의 경우 연료로 주입된 수소가스가 화학 촉매에 의해 전자와 수소이온으로 변환되는데, MFC는 미생물이 일종의 생 촉매제로 사용되어 유기물을 분해하는 과정에서 전자와 수소이온을 발생시킨다. 이 때 전자는 산화전극으로 전달되어 외부도선을 따라 환원전극으로 이동

되며, 수소이온은 이온교환막을 통해 환원전극조로 이동한다. 환원전극조로 이동한 전자와 수소이온은 산소와 같은 전자수용체와 만나서 최종 환원반응을 하여 물로 전환된다. 이 때 전자의 흐름으로 전기에너지가 생성된다[Fig. 1].



[Fig. 1] Microbial fuel cell structure.

MFC가 상용화되기 위해서는 에너지 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 연구가 더 필요하다. 버려지는 유기물을 분해함으로써 환경을 보존할 수 있고, 폐수 처리도 가능한 점과 에탄올, 디젤, 수

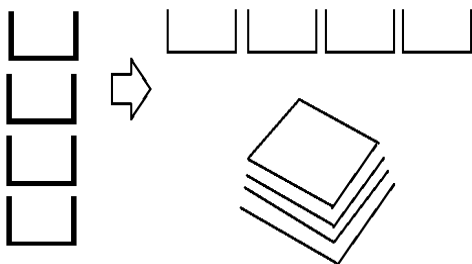
소 등을 생산하는 다른 에너지 혹은 자원화 기술은 복잡한 연료 개질과정에 따라 에너지 회수율이 낮는데 비해 MFC는 유기물로부터 직접 전기 에너지를 생산함으로써 매우 높은 에너지 회수율을 가지고 있다는 점은 앞으로의 발전 가능성을 기대할 수 있다.

MFC의 성능을 향상시키기 위해 MFC시스템의 구성, 운전조건, 미생물의 선택, 전극으로 전자의 완만한 전송을 위한 미생물 대사의 최적화 등에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 전극 성능 및 외부 운전조건 등에 영향을 받는다. 따라서 MFC의 성능을 향상시키기 위하여 최적의 전극재료 선정 및 기술개발은 매우 중요하다. 최근까지의 연구 결과들은 MFC의 상용화를 빠르게 할 것이다.

## 2. MFC의 성능

### 2.1 MFC의 성능이 낮은 이유

현재 연료전지에 비해 MFC의 성능이 낮은 이유는 연료전지에서 수소가 수소이온과 전자로 분리되는 시간보다 미생물 분해시간이 오래 걸린다는 점과 음극에서 산소 환원의 과정에서 과전압이 상당히 높기 때문이다. 또한 연료전지의 경우 금속으로 되어 있어서 조밀하게 스택을 쌓을 수 있는 반면 MFC는 미생물이 사용되기 때문에 일정한 간격을 유지할 수 없기 때문인데 현재 직렬로 스택이 쌓여 있는데 이것을 병렬로 연결하여 층층이 높이 쌓으면 더 좋은 효율을 얻을 수 있다[Fig. 2].



[Fig. 2] Stack change suggestion.

### 2.2 매개변수

MFC의 성능에 미치는 매개변수로는 이온교환막, 산화전극, 환원전극, 산화전극의 면적대비 환원전극 면적비, 전극의 간격, COD농도 등이 있다. 전력 밀도는 MFC의 성능의 성능을 평가하는 가장 중요한 변수 중 하나이다. 이온교환막은 일반적으로 Nafion 117이 사용되는데 Nafion 117을 PP(Poly Propylene) 80으로 교체하면 전력밀도가 향상되어 MFC의 성능이 향상된다 [Table 1].

[Table 1] Comparison of Nafion 117 and PP 80<sup>1)</sup>

Membrane	Cost (\$/m <sup>2</sup> )	Maximum Power density (mW/m <sup>2</sup> )
Nafion 117	2300	24
PP 80	0.57	285

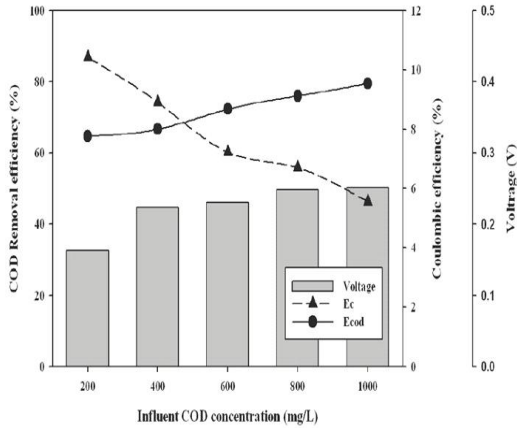
산화전극은 실리콘/게르마늄 합금에서 탄소나 노튜브/폴리아닐린 합금으로 교체하면 공극증가로 인하여 전력밀도가 향상되어 MFC의 성능이 향상된다. 또한 산화전극에 백금도핑을 하면 과전압이 감소하고 환원전극에는 질소도핑을 하면 전력밀도가 상승하여 성능향상에 도움이 된다. 전극간격이 짧아짐에 따라 더높은전력을 얻을 수 있고, 산화전극의 면적대 환원전극 면적비는 높아짐에 따라 최대전력밀도가 증가하여 성능이 높아진다[Table 2].

[Table 2] Compared to Cathode Area Ratio of the Oxide Electrode<sup>2)</sup>

Anode to cathode ratio	Maximum power density (W/m <sup>2</sup> )
1:1	1.1
1:2	1.7
1:4	2.3
1:8	3.5

양성자교환막(proton exchange membrane, PEM)의 크기가 커지면 전압이 상승하고 미생물

연료전지로 유입되는 COD농도가 증가하면 미생물이 섭취할 수 있는 유기물이 증가하여 미생물의 물질대사가 활발하게 이루어지므로 전압과 COD 제거효율이 증가한다[Fig. 3].



[Fig. 3] Effect of input COD concentration on COD removal and coulombic efficiencies.<sup>3)</sup>

### 2.3 전류 전압 특성

개로회로 전압은 옴의 법칙에 기초하여 외부 저항을 통해 회로 전류를 계산하는데 사용될 수 있다.

$$I = \frac{V}{R}$$

( $I$  : Intensity of current

$V$  : Voltage

$R$  : Resistance)

그러면 다음 전압과 효율들도 설명 할 수 있다.

$$V = OCV - \eta \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

( $OCV$  : Open Circuit Voltage

$\eta$  : Efficiency)

여기서,

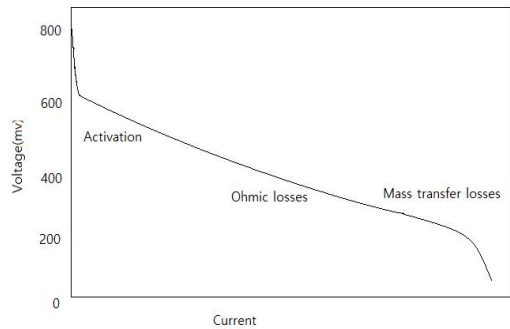
$$\eta = \Delta V_{act} + \Delta V_{ohm} + \Delta V_{tran} \dots\dots \textcircled{2}$$

( $V_{act}$ ) : 전극 표면에서 일어나는 느린 반응에 의한 활성화

$V_{ohm}$ ) : 손실 전해질 및 전극, 및 농도의 저항에 의한 저항 손실

$V_{tran}$ ) : 편광 또는 물질 전달 손실은 전극 표면에 반응물의 손실)

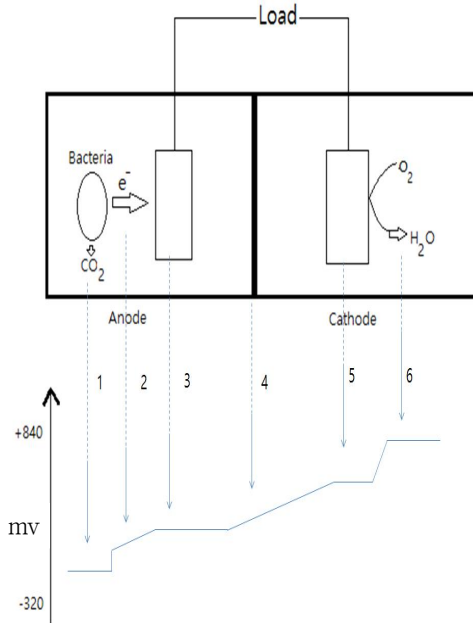
$OCV$ (open circuit voltage)는 전류의 부재 하에 측정 될 수 개방 회로 전압을 반영하여 테스트 하고 시스템에서 얻어 질 수 있는 최대 전압,  $R(int)$ 은 전체 내부 저항이며, 효율은 전극 표면에서 일어나는 느린 반응에 의한 활성화 손실  $V_{act}$ 를 포함 전위 위에 관련된 전류이고, 전해질 및 전극, 및 농도의 저항에 의한 저항 손실  $V_{ohm}$ , 편광 또는 물질 전달 손실은 전극 표면에 반응물의 손실과 연관된  $V_{tran}$ 이다 [Fig. 4].



[Fig. 4] Three areas of overvoltage.<sup>4)</sup>

과전압의 3가지 영역에는 활성화 손실 영역, 옴 손실 영역, 물질전달 손실 영역으로 나누어진다. 활성화 영역은 세포내의 최종 전자수용체로부터 산화전극표면으로 전자가 이동할 때 생기는 에너지손실과 미생물 대사에 의해 유기물의 산화/환원 반응에서 발생하는 열에너지 손실을 말한다. 옴 손실 영역은 미생물연료전지의 전극과 도선을 통한 전자 흐름에 대한 저항, 분리막을 통한 수소이온의 전달 저항, 산화전극부와 환원전극부의 전해질 농도에 의해서 발생 된다. 물질전달 손실 영역은 전극으로 유입, 유출되는 반응물

질 및 생성물의 의 영향을 받아 발생한다. 전력을 높이기 위해서는 MFC의 활성화 전압손실과 저항 전압 손실을 최소화 시켜야 한다[Fig. 5].



- 1 박테리아의 전자 전달로 인한 손실
- 2 폐하수로 인한 손실 (활성화 손실)
- 3 양극에서 손실 (저항 손실)
- 4 MFC 저항 (유용 전위차) 손실과 막 저항 손실 (저항 손실)
- 5 음극에서의 손실 (저항 손실)
- 6 전자 수용체의 감소로 인한 손실 (활성화 손실)

[Fig. 5] Losses that may occur when moving electrons by MFC.<sup>5)</sup>

### 3. MFC 지속성장의 5축

구자공(9)을 바탕으로 본 Green Star의 5대 지표는 다음과 같다[Fig. 6].

#### 3.1 녹색보전성

- Safety - 2차 오염 등 감소 및 안전성 도모
- Health - 친환경 에너지 및 건강 증진
- Environment - 환경오염 물질 배출 최소화
- Nature friendly - 생태계 보전

Quality of life - 삶의 질 향상

#### 3.2 경제성장성

공업폐수/미생물을 이용한 전기생성 비용 절감, 고효율, 투자설비증대, 값싼 에너지원, 무한한 에너지원.

#### 3.3 사회발전성

폐수/가축분뇨의 친환경적인 처리, 에너지강국 이룩, 공장 사회적 이미지 개선, 시설 생산 용이, 무소음.

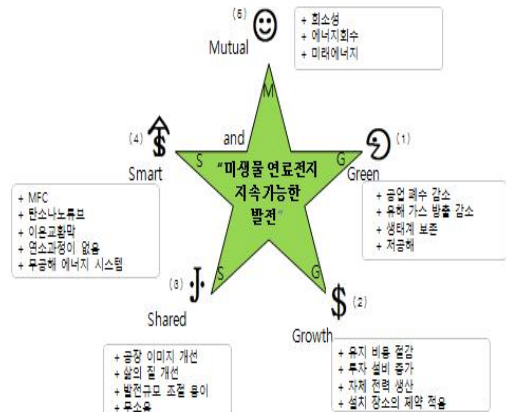
#### 3.4 과학기술예술성

미생물 효율증대, 신에너지 개발, 성능이 높은 MFC를 가장 먼저 만들게 된다면 세계적인 기술을 확보하는 것과 다름없고, 고효율 MFC 생산의 부재로 인한 높은 혁신 기술 개발 가능성, 유기물과 폐수 등을 통한 친환경적 기술개발.

#### 3.5 자율자발성

현재 MFC는 많이 사용되지 않고 있는데 그에 따른 희소성, 각 공장의 자가 폐수처리가능 생성, 손쉬운 에너지 회수, 값싼 비용 및 기회비용, 무한한 에너지.

### ■GG-SSaM [=Green Star]



[Fig. 6] 5-axis green star for the sustainable growth<sup>6)</sup>.

#### 4. 결론

MFC를 이용한 전기생산은 친환경 에너지 기술로서 폐수처리 시설이 소모하는 전력을 MFC로 공급함으로써 경제성을 확보하고자하는 연구들이 계속 시도되고 있다. MFC는 전력량이 미흡하지만 많은 요인들을 고려하면 신재생에너지로서 현재 일반적으로 사용 하고 있는 이온교환막인 Nafion 117 대비 전력밀도가 PP(Poly Propylene) 80에서 약 11배 높은 저비용의 미세 다공성 부직포로 변경하여 하·폐수를 처리하는데 드는 비용을 절감시키면서 전력을 발생시키는 친환경적인 에너지원이 될 수 있을 것이다. 바이오전기 생산 및 폐수처리를 위한 MFC의 구성 및 전극재료, 성능에 미치는 매개변수들에 대해서 살펴보았는데 현재의 기술에 따른 MFC의 크기나 전력생산량의 한계로 대규모로 상용화되기에는 어려움이 있지만 모든 폐기물은 미생물의 먹이로 작용할 수 있다는 점에서 미생물 연료 전지의 지속가능성은 무한하다. 지속성장 5축, GG-SSaM으로 분석해 본 결과 장차 이 분야는 에너지 생산에서 끝나는 것이 아니라 환경오염을 억제하는 방향을 겸한 방안으로 발전되어 보다 많은 이윤 등을 제공하여 소위 영속발전이 가능하다.

#### 참고문헌

- [문정미, “미생물연료전지 실용화를 위한 저비용 분리막 소재 및 전극 간격에 따른 영향평가”, 경희대학교 학위논문], Moon, J.-M., "Impact Evaluation of the low cost membrane materials and electrode spacing for the microbial fuel cell commercialization", Kyung Hee University dissertation, (2014).
- [김홍석·곽지훈·김병균·김연권, “침지식 공기호흡 미생물연료전지에서 환원전극 재료 및 전극비가 에너지 생산에 미치는 영향”, 한국수처리학회지], Kim, H.-S., Gwak, J.-H., Kim, B.-G. and Kim, Y.-G., "Effects of the cathode electrode materials and energy production in the rain submerged air breathing microbial fuel cell", Journal of Korea Water, 22(4), pp. 11~21 (2014).
- [정재우·최영대·이명은·송영채·우정희·유규선·이채영, “연속식 미생물연료전지 성능에 미치는 운전변수의 영향”, 대한상하수도학회지], Jung, J.-W., Choi, Y.-D., Lee, M.E., Song, Y.-C., Woo, J.H., Yu, G.-S. and Lee, C.-Y., "Effects of operating parameters on the performance of continuous flow microbial fuel cell ", Journal of Water and Wastewater, 27(4), pp. 489~494 (2013).
- Hong Liu, "Microbial Fuel Cell: novel Anaerobic Biotechnology for Energy Generation from Wastewater" pp.221~246 (2008).
- [나재운·노성희, “바이오에너지 생산 및 폐수처리를 위한 미생물연료전지”, 공업화학], Na, J.-W. and No, S.-H., "Microbial Fuel Cells for Bioenergy Generation and Wastewater Treatment", Industrial and Engineering Chemistry, 24(6), pp. 567~578 (2013).
- [구자공·박상렬·이슬기, “지속가능/영속(永續)발전을 위한 지속성/안녕(安寧)성의 5대 지표(=SSaM-GG) 개발”, 유기성자원학회], Koo, J.-K., et.al, "Five Indices of SSaM-GG (= Smart, Share, and Mutual-Green Growth) for Sustainable Development", Journal of Organic Resource, 20 (4), (2012).

