

## 미생물 연료전지의 원리 및 환경보건 분야로의 응용

한전기<sup>†</sup>

한국방송통신대학교 환경보건학과

### Microbial Fuel Cells: Principles and Applications to Environmental Health

Sun-Kee Han<sup>†</sup>

Department of Environmental Health, Korea National Open University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

The research on microbial fuel cells (MFCs) needs various knowledge of different fields such as electrochemistry, microbiology, environmental engineering, and material engineering. Although electrochemically active bacteria are very diverse, the performance of MFCs is affected primarily by the structure of the reactor system. Thus, the development in the system architecture is critical to lower internal resistance and increase power generation for commercialization. This paper summarizes the principles of MFCs and demonstrates the infinite potential of MFCs in various applications including wastewater treatment, biosensors, biohydrogen production, remote power sources, implantable medical devices, etc.

**Keywords:** applications, electrochemically active bacteria, microbial fuel cells (MFCs), principles, system architecture

#### I. 서 론

인류는 다양한 에너지원을 이용하려고 노력하고 있으나, 아직도 대부분의 사회는 화석에너지에 절대적으로 의존하고 있다. 석유와 같은 화석에너지는 부존량이 유한하여 지속가능하지 못할 뿐 아니라 온실가스인 이산화탄소를 발생시켜 지구온난화를 유발하고 있다. 이로 인해 온실가스를 발생시키지 않는 다양한 바이오기술들이 연구되고 있으며, 이 중에서 최근 가장 각광을 받고 있는 것이 미생물 연료전지(microbial fuel cells, MFCs)이다.

1839년 Grove는 전기를 사용해서 물을 수소와 산소로 분해한다면 그 반대의 경우도 가능하다고 가정하여, 이를 바탕으로 첫 연료전지(fuel cell)를 만들었다.<sup>1)</sup> 그리고 1911년 Potter는 미생물을 이용하

여 전기가 생산될 수 있음을 발견하였는데, 이것이 미생물 연료전지에 대한 첫 번째 연구이다.<sup>2)</sup> 1931년에는 Cohen이 미생물의 전류생산 능력을 조사하였지만, 1960년대 초반까지는 별다른 진전이 없었다.<sup>3,4)</sup>

그 후 1960년대 중반부터 미생물 연료전지에 대한 연구가 다시 이어졌는데, 당시의 미생물 연료전지 효율은 매우 낮았다. 이것은 미생물이 유기물을 분해하면서 얻은 전자를 불용성 산화전극(anode)까지 잘 전달시키지 못했기 때문이다. 1980년대에는 Allen 및 Bennetto가 외부 전자전달 매개체(mediator)를 주입하여 미생물 전지연료의 효율을 크게 높였다.<sup>5)</sup> 이때까지만 해도 미생물 연료전지가 어느 정도 이상의 전기를 생산하기 위해서는 외부 전자전달 매개체의 주입이 필요하다고 생각되었는데, 이것을 매

<sup>†</sup>Corresponding author: Department of Environmental Health, Korea National Open University, Seoul 110-791, Korea, Tel: +82-2-3668-4740, Fax: +82-2-741-4701, E-mail: skhan003@knou.ac.kr

Received: 13 March 2012, Revised: 19 March 2012, Accepted: 30 March 2012

개체형 미생물 연료전지라고 한다. 대부분의 미생물은 전기화학적으로 활성이 없기 때문에, 미생물 세포에서부터 산화전극으로의 전자전달은 thionine, methyl viologen, methylene blue, anthraquinone-2,6-disulfonate(AQDS), humic acid, neutral red, meldola's blue, 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone, Fe(III)EDTA 등과 같은 외부에서 주입된 매개체에 의해서 이루어졌다. 하지만 이러한 전자전달 매개체는 고가이며 독성을 가진다.<sup>6,7)</sup>

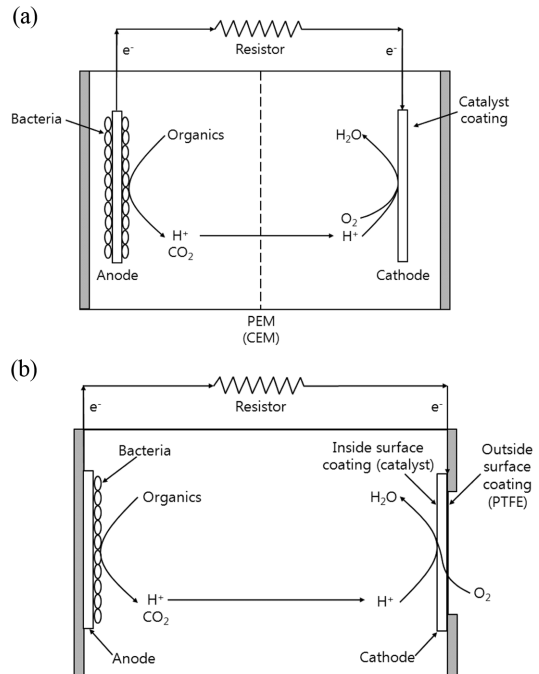
그 후 1999년 Kim 등<sup>8,9)</sup>은 전자전달 매개체가 필요없는 미생물 연료전지를 발표함으로써 미생물 연료전지 연구의 새로운 장을 열었다. 즉, 철환원균인 *Shewanella putrefaciens*가 별도의 매개체 주입 없이도 세포 체내에서 발생한 전자를 세포 체외의 불용성 산화전극으로 직접 전달함으로써 전기가 생산될 수 있음을 보고한 것이다. 이로 인해 무매개체(mediator-less)형 미생물 연료전지의 본격적인 연구가 진행되었다.

21세기에 들어서는 미생물 연료전지에 대한 연구가 급증하는 추세를 보이고 있다. 그로인해 미생물 연료전지에 관여하는 다양한 미생물의 종류 및 특성, 그리고 다양한 전자전달 매커니즘이 밝혀지고 있으며, 또한 다양한 재료의 미생물 연료전지가 만들어지고 그 형태도 나날이 증가하고 있다.<sup>10-14)</sup> 그 결과 10여년 전보다 미생물 연료전지의 전력밀도는 10,000배 정도 크게 향상되었으며, 제작 및 운전비용은 크게 감소하였다. 그리고 미생물 연료전지의 응용분야는 하폐수 처리에서부터 바이오센서, 무인 원격 동력원, 바이오수소 생산, 의료용 생체 이식 동력원 등과 같이 매우 다양하게 확대되고 있다.<sup>15-18)</sup>

본 논문에서는 미생물 연료전지의 개념, 재료, 이론 등을 자세하게 살펴보고, 이를 바탕으로 환경보건 분야로의 응용방법을 제시하고자 한다. 미생물 연료전지의 환경보건 분야로의 응용은 매우 다양하며, 각각에 대해서 그 원리와 가능성 및 한계를 같이 다루었다.

## II. 미생물 연료전지의 개념

미생물 연료전지는 전기화학적 활성을 지닌 혐기성 미생물의 촉매작용을 이용하여 유기물에 함유된 화학



**Fig. 1.** Concept of microbial fuel cell (MFC). (a) double-chamber MFC, (b) single-chamber MFC.

에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 것이다.<sup>10-18)</sup>

Fig. 1에서 보는 바와 같이 미생물 연료전지는 크게 이실 미생물 연료전지(double-chamber MFC)와 단일 미생물 연료전지(single-chamber MFC)로 나눌 수 있다. 이실 미생물 연료전지는 예전부터 널리 사용되어 온 형태이며, 단일 미생물 연료전지는 가장 단순하고 저렴한 형태의 것으로서 현재 그 사용이 증가하고 있다. 이실 미생물 연료전지의 경우 산화전극이 포함된 반응조, 환원전극(cathode)이 포함된 반응조, 분리막(membrane) 및 양쪽의 전극을 도선으로 연결한 외부 전기회로로 구성된다. 그리고 단일 미생물 연료전지의 경우 산화전극 및 환원전극이 모두 포함된 하나의 반응조 및 양쪽의 전극을 도선으로 연결한 외부 전기회로로 구성된다.<sup>11-13)</sup>

미생물 연료전지에서는 산화전극 표면에 생물막(biofilm) 형태로 존재하는 혐기성 미생물에 의해서 반응조로 주입되는 유기물의 분해가 이루어져 전자(electron)와 양성자(proton), 이산화탄소(CO₂)가 생성된다. 이 때 전자는 혐기성 미생물의 다양한 전자전달 매커니즘에 의해서 산화전극으로 전달된 후, 외

부저항이 유발한 전위차에 의해서 도선을 통해 환원전극으로 이동한다. 그리고 양성자는 용액과 분리막을 통해(이실 미생물 연료전지의 경우) 또는 용액을 통해(단실 미생물 연료전지의 경우) 환원전극으로 이동한다. 최종적으로 이러한 전자와 양성자는 외부에서 환원전극으로 공급된 산소(O<sub>2</sub>)와 함께 반응하여 물(H<sub>2</sub>O)을 생성한다.<sup>12,13)</sup>

호기성에서는 미생물이 산소를 전자수용체로 사용하여 물을 생산하지만, 미생물 연료전지의 산화전극은 혐기성이기 때문에 미생물은 자신들의 전자수용체를 불용성 전자수용체인 산화전극으로 바꾸게 된다. 전자를 불용성 전자수용체로 전달시키는 미생물의 능력으로 인해 우리는 미생물 연료전지를 이용하여 미생물 대사작용으로부터 발생하는 전자를 모을 수 있다.<sup>19)</sup>

이때, 전류는 기기로 측정된 전압과 이미 알고 있는 저항의 값을 이용하여 계산된다.

### III. 미생물 연료전지의 재료

#### 1. 산화전극

산화전극 재료는 다음과 같은 특성을 지녀야 한다.<sup>11,20,21)</sup>

- 전기 전도도(electrical conductivity)가 높고, 저항이 낮아야 한다.
- 미생물에게 독성이 없어야 한다.
- 미생물에게 친화성(biocompatibility)이 커야 한다.
- 화학적 안정성(chemical stability)이 있고, 부식(corrosion)이 되지 않아야 한다.
- 구입비용이 저렴해야 한다.
- 적절한 기계적 강도(mechanical strength)와 인성(toughness)을 가져야 한다.
- 내구성(durability)이 좋아야 한다.
- 단위부피당 비표면적(specific surface area)이 커야 한다.
- 미생물 증식에 따른 막힘이 없어야 한다.
- 규모확대가 용이해야 한다.

그리고 위와 같은 특성에 따라 미생물 연료전지의 산화전극에서 사용되는 재료는 Table 1과 같다. 단, 산화전극의 전기 전도도는 전압계를 재료에 1cm 간격으로 접촉시켜 그 2점 사이의 저항( $\Omega/\text{cm}$ )으로 평

가하며, 저항의 역수인 도전율(S/m)로서 나타낸다.

#### 2. 환원전극

환원전극 재료는 다음과 같은 특성을 지녀야 한다.<sup>11,20,21)</sup>

- 양성자를 쉽게 포획할 수 있는 높은 산화환원전위를 가져야 한다.
- 화학적으로 안정해야 한다.
- 구입비용이 저렴해야 한다.
- 내구성이 좋아야 한다.
- 단위부피당 비표면적이 넓어야 한다.
- 규모확대가 용이해야 한다.

환원전극 재료로서 요구되는 특성은 앞서 살펴본 산화전극 재료로서 요구되는 특성과 매우 유사하다. 보통 Table 1에 나타난 산화전극 재료가 환원전극 재료로서도 이용이 되는데, 그 중에서도 탄소 천, 탄소 종이, 흑연 평판, 흑연 포일 등이 많이 이용된다. 하지만 전자와 양성자 및 산소(전자수용체)가 만나서 이루어지는 산소환원 반응은 매우 느려서, 이를 극복하기 위해서 일반적으로 산소환원 효율이 좋은 백금(Pt) 촉매를 환원전극의 재료표면에 코팅하여 이용한다.<sup>11,20,21)</sup>

하지만 백금 촉매는 고가이기 때문에 현실적인 측면에서 저렴한 대체 촉매를 찾는 연구도 이루어지고 있다. Ferric iron, manganese oxides, iron complexes, cobalt complexes 등이 다양하게 연구되었는데, FePc(iron phthalocyanine), PbO<sub>2</sub>, CoTMPP(cobalt tetramethoxyphenylporphyrin)는 저렴한 가격으로 백금보다 더 나은 결과를 보여주었다.<sup>14,20)</sup> Table 2는 환원전극에 사용된 비백금 촉매를 보여주고 있다.

또한 환원전극의 효율은 전자수용체의 영향을 크게 받는다. 전자수용체는 6시아노철이온([Fe(CN)<sub>6</sub>]<sup>3+</sup>), 과망간산 이온(MnO<sub>4</sub><sup>+</sup>), 제2철이온(Fe<sub>3</sub><sup>+</sup>) 등을 함유한 액상 용액과 기상인 공기 중 산소로 구분된다.<sup>11,21)</sup> 액상인 전자수용체 용액은 높은 전력을 생산하지만 재생이 되지 않는다. 따라서 높은 운전비용이 소요되는 단점이 있어 연구용 미생물 연료전지에만 적용된다.<sup>14,19)</sup> 이와 달리 공기 중 산소는 풍부하게 존재하기 때문에 아주 저렴하게 공급할 수 있고 또한 최종 반응산물로 별도의 부산물 없이 물만을 발생시키는 장점이 있어, 일반적으로 가장 많이 사용된다.<sup>21)</sup>

**Table 1.** Anodic materials used for microbial fuel cell<sup>20,21,23)</sup>

Anodic material	Characteristics	
CARBON	Carbon paper	- stiffness and slight brittleness - low durability - reduction in the distance between two electrodes - easy connection of wires
	Carbon cloth	- high porosity and conductivity (110~220 S/m) - reduction in the distance between two electrodes - higher flexibility compared to carbon plate - high cost
	Carbon mesh	- lower cost compared to carbon cloth - enhanced power density compared to carbon cloth
	Carbon felt	- high specific surface area - large aperture - large resistance
	Carbon foam	- high conductivity (113~142 S/m) - a little higher thickness compared to carbon cloth - high porosity and specific surface area
	Reticulated vitreous carbon (RVC)	- high plasticity and conductivity (208~455 S/m) - high porosity and specific surface area - large resistance - high brittleness
	Carbon nano tube (CNT)	- highest specific surface area (1,300 m <sup>2</sup> /g) - high mechanical strength and ductility - excellent stability and conductivity (5.8 × 10 <sup>10</sup> S/m) - high cost (\$80100/g) - clogging
	Conductive polymer/CNTs composites	- synergistic effect due to CNTs in conductive polymer - various composites such as CNT/polyaniline composite, carbon paper with polypyrrole/CNTs, carbon cloth with CNTs, etc.
	Graphite plate	- stiffness and slight brittleness - easy connection of wires
	GRAPHITE	Graphite felt
Graphite rod		- high stability and conductivity (7 × 10 <sup>4</sup> S/m) - relatively defined surface area (low internal porosity) - lightly sanded to increase specific surface area for microbial attachment
Graphite sheet		- no porosity - soft sheets with various thickness - less power production per projected surface area
Graphite granule		- small chunk of graphite particle with mean diameter of 1.5~5.5 mm - high specific surface area (20~2,700 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
Graphite fiber brush		- higher specific surface area - low electrode resistance - graphite fiber is wound around conductive corrosion-resistant metal wires (titanium wires) - clogging

**Table 2.** Non-Pt catalysts used for cathode of microbial fuel cell<sup>20)</sup>

Catalyst type	Cathodic material	Maximum power density (mW/m <sup>2</sup> )
FePc	carbon paper	634
PbO <sub>2</sub>	Ti sheeting	485
CoTMPP	carbon paper	483
Pt	graphite felt	150

그러나 물에서의 산소 용해도는 낮기 때문에, 환원전극에서 소비되는 산소가 물속에 용해되는 산소의 속도를 초과할 때 산소 부족으로 인해 미생물 연료전지의 효율은 저하된다. 이러한 현상은 이질 미생물 연료전지에서 자주 나타난다. 이러한 문제는 외부 공기(산소)를 직접 공급하는 외기-산화전극(air-cathode)을 이용하는 단일 미생물 연료전지에서 개선될 수 있다.<sup>11,14)</sup> 단일 미생물 연료전지에서는 용액과 접촉하는 환원전극의 내부표면은 백금 촉매를 이용하여 코팅하고 공기(산소)와 접촉하는 외부표면은 PTFE(polytetrafluoroethylene)와 같은 소수성(hydrophobic) 물질을 코팅함으로써, 내부에 위치하는 백금 촉매에는 충분한 산소를 공급하는 동시에 외부로 발생할 수 있는 누수문제는 최소화 할 수 있다.<sup>20,21)</sup>

그밖에 백금 대신 미생물이 촉매작용을 하는 바이오 환원전극(biocathode)도 있다. 환원전극의 반응은 충분한 양의 산소가 필요하지만, 바이오 환원전극의 경우는 미생물에 의해서 산소 환원반응이 이루어지기 때문에 용존산소가 12 mg/l이면 충분하다. 또한 질산염, 황산염과 같은 물질을 산소 대신 전자수용체로 이용하여 이들 물질을 제거할 수 있다.<sup>14,22)</sup> 바이오 환원전극은 값비싼 백금이 필요하지 않아 제조 및 운전 비용을 줄일 수 있지만, 아직까지 백금 촉매에 비해서 성능이 낮다.<sup>23)</sup>

### 3. 분리막

이질 미생물 연료전지에서 사용되는 분리막은 산화전극 반응조와 환원전극 반응조를 분리하기 위한 것으로 산화전극에서 생성된 양성자를 환원전극으로 전달한다. 따라서 양성자 교환막(proton exchange membrane, PEM) 또는 양이온 교환막(cation exchange membrane, CEM)이라고 한다. 분리막은 우선 양성

자의 투과성은 우수해야 하지만 그 외의 물질들(유기물, 전자, 산소 등)은 투과되지 않도록 해야 한다. 또한 부식성이 없이 안정적이어야 하고 내구성이 있어야 한다.<sup>11,14)</sup> 가장 많이 사용되는 것은 Nafion 117(Dupont Co., USA)이지만, 고가(\$780/m<sup>2</sup> 이상)이며 환원전극으로부터 산소가 확산되어 산화전극의 전위를 높일 수 있는 단점이 있다. 그래서 Nafion 117보다 상대적으로 비용대비 효율이 좋고 구조적으로 튼튼하고 두꺼운 Ultrex CMI-7000(Membranes International Inc., USA) 등이 그 대안으로 사용되기도 한다.<sup>14,21)</sup>

하지만 단일 미생물 연료전지에서는 고가인 분리막이 필요가 없으며, 오히려 이질 미생물 연료전지보다 더 높은 전력수율을 보여주었다. 따라서 분리막은 미생물 연료전지에서 충분히 제거될 수 있다.<sup>11,12)</sup>

## IV. 미생물 연료전지의 이론

### 1. 미생물

많은 미생물들이 유기물의 대사작용으로부터 얻은 전자를 산화전극에 전달할 수 있는 능력을 가지고 있다. 이렇게 전자를 생성하여 세포외부로 전달할 수 있는 미생물을 총칭해서 'exoelectrogen'이라 한다.<sup>13)</sup> 이러한 미생물들은 토양, 폐수, 해양 퇴적물, 담수 퇴적물, 활성 슬러지, 혐기성 슬러지와 같은 다양한 곳으로부터 얻어질 수 있다.<sup>18)</sup>

미생물 연료전지의 주된 미생물은 *Shewanella*, *Geobacter*와 같은 철환원세균(iron-reducing bacteria)으로 생각되지만 분자생물학적 미생물 군집구조 분석법에 의하면 이들 미생물보다 훨씬 더 많은 미생물이 존재함을 확인할 수 있다. 대표적인 미생물에는 *Shewanella putrefaciens*, *Clostridium butyricum*, *Geobacter metallireducens*, *Geobacter sulfurreducens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Shewanella oneidensis*, *Desulfovibrio desulfuricans* 등이 있다.<sup>13,18)</sup>

미생물 연료전지의 생물막에 대한 연구는 산화전극에 부착성장하는 미생물 군집에는 대표적 우점종이 존재하지 않는다는 것을 보여주었다. 이것은 상당히 다양한 미생물이 전기를 생산할 수 있다는 것을 보여주는 것이며, 이러한 미생물군집은 반응조의 구조, 기질의 종류, 환원전극 전자수용체의 종류, 다양한 운전조건(pH, 산화환원전위, 이온강도, 온도

등)에 따라 달라진다.<sup>13)</sup> 또한 미생물 균집의 일부는 발효(fermentation), 메탄화(methanogenesis) 및 그 밖의 대사작용에 의해서 전기생산이 아닌 일에 기질을 소모한다.<sup>18)</sup>

## 2. 미생물에 의한 전자전달 메커니즘

미생물 연료전지에서 발견되는 미생물은 다음과 같은 방법으로 전자를 산화전극에 전달한다.

1) 직접 접촉에 의한 전자전달(electron transfer by direct contact)

*Shewanella oneidensis*와 *Geobacter sulfurreducens*는 미생물의 외부 세포막(outer membrane)에 시토크롬(cytochrome)을 형성하는데, 이를 이용함으로써 산화전극 표면에 직접 접촉하여 전자를 전달한다.<sup>7,10,13)</sup> 참고로 시토크롬은 전자전달계의 구성성분으로서 세포의 산화환원반응에 작용하는 색소 단백질이다. 그리고 *Shewanella*는 하나의 시토크롬만을 형성할 때도 있지만, 경우에 따라서는 여러 개로 이루어진 시토크롬 층을 형성하여 전자를 전달하기도 한다.<sup>13,17,18,23)</sup>

2) 전자 운반체(electron shuttle)를 이용한 전자전달

*Pseudomonas aeruginosa*는 pyocyanine과 같은 전자 운반체를 생성하여 세포와 산화전극과의 직접적인 접촉없이 전자를 전달한다. 그리고 *Shewanella oneidensis*는 첫 번째 전자전달 메커니즘 이외에도 flavin과 같은 전자 운반체를 생성하여 전자를 산화전극에 전달할 수 있다.<sup>12,13,18)</sup> 그리고 *Pseudomonas*에 의해서 생산된 phenazine과 같은 전자 운반체는 전기화학적 활성이 없는 다른 그람 양성균으로 하여

금 산화전극으로의 전자전달을 가능하게 하였다. 즉, 전기화학적 활성이 없는 미생물도 다른 미생물에 의해서 생산된 전자 운반체를 사용하면 전기생산이 가능한 것이다.<sup>17,18,23)</sup>

3) 고전도성 나노와이어(nanowire)를 이용한 전자전달

*Geobacter sulfurreducens*는 길고 얇은 단일가닥의 나노와이어를 생성하여 직접적인 접촉 없이도 전자를 산화전극의 표면으로 전달할 수 있다. 또한 *Shewanella oneidensis*는 첫 번째와 두 번째의 메커니즘 외에도 여러 가닥의 와이어가 다발의 형태로 묶인 나노와이어를 생성하여 전자를 산화전극에 전달할 수 있다.<sup>13,17,18)</sup> 그리고 여러 세포들이 나노와이어로 길게 이어진 경우에도 미생물 세포간의 전자전달이 일어나 산화전극으로의 전자전달이 가능하였다. 즉, 미생물이 산화전극으로부터 멀리 떨어진 경우에도 나노와이어로 이어진 미생물간의 연결에 의해서 전기생산이 가능한 것이다.<sup>15,17,18,23)</sup>

## 3. 미생물 연료전지의 인자

미생물 연료전지와 관련된 인자를 정리하면 Table 3과 같다. 전력밀도(power density)는 산화전극의 면적(또는 환원전극의 면적)에 대한 발생 전력의 비(W/m<sup>2</sup>)로서 나타내기도 하며, 산화전극의 부피(또는 산화전극 및 환원전극의 부피 합)에 대한 발생 전력의 비(W/m<sup>3</sup>)로서 나타내기도 한다. 그리고 전류밀도(current density)는 산화전극의 면적에 대한 발생 전류의 비(A/m<sup>2</sup>)로서 나타낸다. 한편, 개회로 전압(open circuit voltage)은 전류가 없는 상태에서 측정되는 산화전극과 환원전극 사이의 전압(V)이며, 내부저항

**Table 3.** Parameters used for evaluating the performance of microbial fuel cell<sup>14)</sup>

Parameter	Unit	Description
Power density	W/m <sup>2</sup>	A power output is normalized to an anode area or cathode area.
	W/m <sup>3</sup>	A power output is normalized to an anode volume or a sum of anode and cathode volumes.
Current density	A/m <sup>2</sup>	A current generated is normalized to an anode area.
Open circuit voltage (OCV)	V	This is a voltage between the anode and cathode measured in the absence of current.
Internal resistance (R <sub>int</sub> )	Ω	This is obtained from the slope of the polarization curve and is useful to evaluate the total internal loss in an MFC.
Coulombic efficiency (CE)	%	This is defined as the ratio of Coulombs measured as the current to the total Coulombs contained in substrates (COD).

(internal resistance)은 분극곡선(polarization curve)의 기울기로부터 얻어지는 것으로 미생물 연료전지의 전압손실을 평가하는데 유용하게 사용된다. 또한 쿨롱 효율(Coulombic efficiency)은 기질에 포함되어 있는 총 전하량과 전류로서 측정된 전하량의 비를 의미한다.<sup>14)</sup>

**4. 미생물 연료전지의 전기발생량, 전압강하요인 및 분극곡선/전력곡선**

폐회로(closed circuit)에서 운전되는 미생물 연료전지의 실제 전압은 개회로(open circuit)의 전압보다 낮다. 이는 전류가 흐르기 시작하면서 다양한 저항들이 전압에 반영되기 때문이다. 미생물 연료전지의 실제 전압과 이론 전압은 다음의 관계가 성립한다.<sup>11,14,23)</sup>

$$V_{cell} = V_{emf} - (\Sigma\eta_a + |\Sigma\eta_c| + I \cdot R_{\Omega}) \quad (1)$$

여기서,

- $V_{cell}$  : 미생물 세포(cell)에 의해서 발생하는 실제 전압
- $V_{emf}$  : 최대 기전력(electromotive force, emf)으로서 계산된 이론 전압
- $\Sigma\eta_a$  : 산화전극에서 일어나는 전기화학작용의 비가역성에 의한 전압손실
- $|\Sigma\eta_c|$  : 환원전극에서 일어나는 전기화학작용의 비가역성에 의한 전압손실
- $I \cdot R_{\Omega}$  : 생산된 전류와 시스템의 저항에 비례하는 모든 옴저항에 의한 전압손실

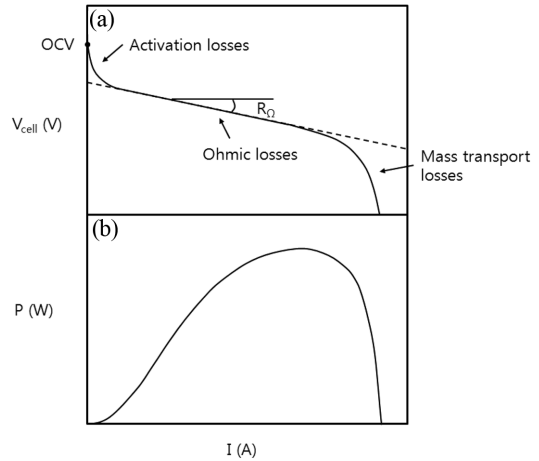
미생물 연료전지에서 측정되는 전압이 전류에 정비례한다면 위의 식 (1)은 다음과 같이 단순화 될 수 있다.<sup>11,14,23)</sup>

$$V_{cell} = OCV - I \cdot R_{int} \quad (2)$$

개회로 조건에서 발생하는 산화전극과 환원전극의 전위차는  $OCV$ 에 포함되며, 전극간 전위차에 의존하는 전류와 시스템의 옴저항에 비례하는 모든 옴저항에 의한 전압손실은  $I \cdot R_{int}$ 에 포함된다.

다음은 여러 가지 미생물 연료전지의 전압손실 요인이다.

- 활성화 저항에 의한 전압손실(activation losses)  
산화환원 반응을 일으키기 위해서는 활성화 에너지



**Fig. 2.** Polarization and power curves used for evaluating the performance of microbial fuel cell. (a) polarization curve, (b) power curve.<sup>14,16)</sup>

지의 장벽을 넘어야 하는데, 이로인해 나타나는 전압손실을 의미한다. 미생물과 전극 사이의 상호작용이 이루어지는 전극의 표면특성과 관련이 있는 것으로, 미생물이 얻은 전자가 산화전극 표면으로 전달되는 과정에서 또한 도선을 통해 이동한 전자가 환원전극 표면으로 전달되는 과정에서 발생된다.<sup>10,11,15,16,23)</sup> 보통 산화전극보다는 환원전극에서의 반응에서 더 많은 전압손실이 발생한다. 보통 전류가 낮을 때 나타나며, Fig. 2의 초기부분에 해당한다.<sup>11)</sup>

• 옴 저항에 의한 전압손실(ohmic losses)

전자의 흐름은 전극재료의 저항에 의해서 감소되며, 이로인해 옴저항에 의한 전압손실이 발생한다. 옴저항은 내부저항의 대부분을 차지하는 것으로, 전극표면의 접촉부분, 전극의 종류, 회로의 연결부분, 도선의 종류, 전극간 거리, 분리막의 종류, 전해질 용액의 종류 등에 의해서 유발된다.<sup>10,11,16,23)</sup> 세분하면 전극, 도선, 회로를 통한 전자의 이동에서 발생하는 것과 전해질 용액, 분리막을 통한 이온의 이동에서 발생하는 것으로 나눌 수 있다. 전극재료의 전도도가 높을수록, 전극 안에서 전자의 접촉저항이 낮을수록, 전극 안에서 전자의 이동거리가 짧을수록, 전자의 흐름은 효율적이 되어 옴저항에 의한 전압손실은 감소된다. 또한 전해질의 전도도가 높을수록, 전해질의 비퍼능력이 높을수록, 전극간 거리가 최적화될수록, 이온의 흐름은 효율적이 되어 옴저항에 의

**Table 4.** Internal resistance types and factors affecting internal resistance performance of microbial fuel cell<sup>24)</sup>

Components of internal resistance	Anode	Membrane	Cathode
Activation losses	- Amount and activity of electrochemically active microorganisms - Specific surface area of electrode - Intrinsic electron transfer rate of the rate determining enzyme/redox system - Temperature - Fuel and nutrient supply - Buffer strength		- Amount and activity of catalysts - Specific surface area of electrode - Temperature - Oxidant supply - Buffer strength (proton supply)
Ohmic losses	- Electrode conductivity - Resistance of electrical contacts and wire - Anolyte conductivity - Electrode spacing	- Membrane conductivity	- Electrode conductivity - Resistance of electrical contacts and wire - Catholyte conductivity
Mass transport losses	- Fuel and other nutrients supply - Effective diffusivity of reactants and products - Biofilm structure - Anodic electrode design - Anode compartment design - Hydrodynamic condition		- Oxidant supply - Buffer strength - Effective diffusivity of reactants and products - Cathodic electrode design - Cathodic compartment design - Hydrodynamic condition
Other losses	- Unwanted side reactions	- Fuel crossover - Oxygen crossover	- Unwanted side reactions

한 전압손실은 감소된다.<sup>11,15,16,23)</sup> 전류와 전압과의 관계가 선형적으로 나타나는 Fig. 2의 두 번째 부분에 해당한다. 따라서 옴 저항( $R_{\Omega}$ )은 그래프 선형구간의 기울기로 구할 수 있다.<sup>11)</sup>

• 물질전달 저항에 의한 전압손실(mass transport losses or concentration losses)

반응물의 공급과 생성물의 제거가 제때에 이루어지지 않을 때 발생한다. 즉, 유기물의 공급부족으로 산화전극에 전달되는 전자가 감소하거나 또는 산화전극에서 생성된 양성자가 환원전극으로 제때에 이동하지 않고 축적이 되는 경우에 발생한다.<sup>11,15,16,23)</sup> 산화전극의 적절한 설계와 운전은 물질전달 저항에 의한 전압손실을 감소시키는데 매우 중요하다. 주로 높은 전류밀도에서 발생하는데, Fig. 2의 마지막 부분에 해당한다.<sup>11)</sup>

그리고 그 밖에도 다른 저항들이 존재할 수 있다.

다음의 Table 4는 미생물 연료전지에 있어 내부저항의 종류 및 이에 대한 영향인자들이다.

## V. 미생물 연료전지의 응용

### 1. 무인 원격 동력원

자연으로부터 얻은 많은 양의 데이터는 자연 생태계를 이해하고 모사하는데 큰 도움을 준다. 하지만 장기간에 걸쳐 자연으로부터 대량의 데이터를 얻기 위해서는 도처에 센서를 설치하고 주기적으로 동력원을 교체해 주어야 하는 어려움이 있다. 특히, 호수, 강, 바다의 바닥에 인접한 저부는 접근이 어려워 동력원의 교체가 매우 어려운데, 이런 곳에 초소형 미생물 연료전지가 소형기기의 무인 원격 동력원으로 이용될 수 있다.<sup>12,25)</sup> 산화전극을 혐기성 퇴적물에 설치하고, 환원전극을 용존산소가 존재하는 수면에 설치하는 것이다. 그러면 혐기성 퇴적물은 유기물을 공급하고, 바닷물의 염분은 전극사이의 이온전도성을 제공하여 전기를 생산할 수 있게 된다.<sup>25)</sup> Reimers 등<sup>26)</sup>에 의하면 4-10 mW/m<sup>2</sup>의 전력이 생산되었고, Tender 등<sup>27)</sup>에 의하면 30 mW/m<sup>2</sup>까지 생산되었다. 그리고 Ringeisen 등<sup>28)</sup>은 무려 500 W/m<sup>3</sup>의



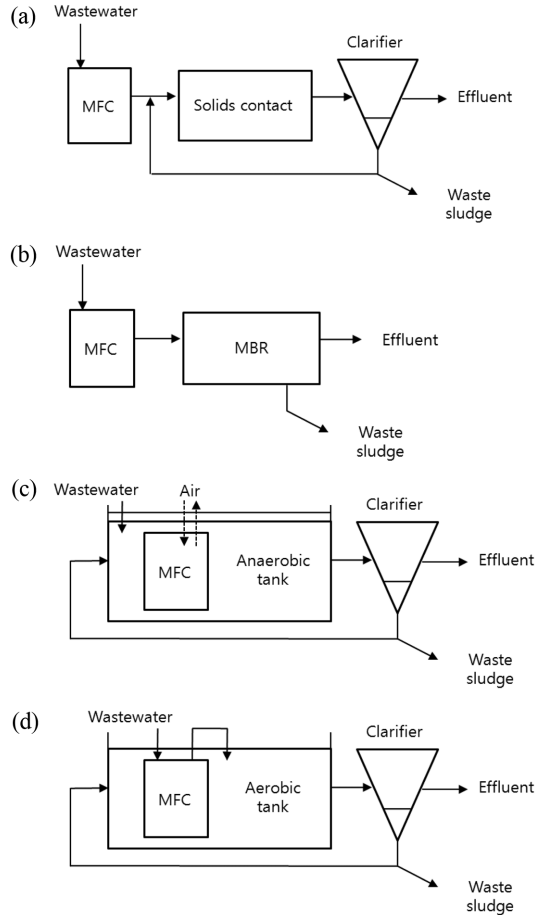
높은 전력밀도를 얻기도 했다. 무인 원격 동력원으로 이용되는 초소형 미생물 연료전지는 부피대비 표면적이 크고, 반응물질의 확산거리가 매우 짧아 보통의 미생물 연료전지 보다 전력밀도가 매우 높다.<sup>25)</sup>

**2. BOD(biochemical oxygen demand) 센서**

하폐수의 BOD와 쿨롱 수율(Coulombic yield)은 넓은 범위에 있어서 선형관계가 있다. 따라서 하폐수의 BOD를 현장에서 직접 측정하는 기기로서 미생물연료전지가 이용될 수 있다.<sup>29,30)</sup> 미생물연료전지를 이용한 BOD 센서는 지표수, 2차 유출수, 회석된 고농도 시료와 같이 농도가 낮은 BOD의 경우에는 실시간으로 이용될 수 있으며, 뛰어난 안정성과 재현성, 정확성을 갖고 있어서 다른 종류의 BOD 센서보다 많은 장점을 가지고 있다.<sup>31)</sup> 그러나 고농도 BOD의 경우에는 BOD가 다 소모된 이후에 쿨롱 수율이 계산되기 때문에 많은 시간을 기다려야 하는 단점이 있다.<sup>7)</sup>

**3. 하폐수 처리**

하폐수의 유기물을 기질로 이용할 경우 원료비용이 거의 들지 않으며, 수처리와 전기생산이라는 일석이조의 장점을 가질 수가 있다. 또한 기존의 생물학적 공정과 비교 시, 폭기가 필요 없어 에너지 사용이 절감되고, 슬러지 발생량이 감소하여 처리비용을 줄일 수 있으며, 다양한 농도범위의 하폐수를 처리할 수 있고, 직접적인 전력생산으로 에너지 전환에 따른 에너지 손실도 방지할 수 있다.<sup>7,10,11,12,14,15,17)</sup> 기본적으로 하폐수 처리공정은 미생물 연료전지와 다양한 형태로 결합이 가능하다. 미생물 연료전지는 일종의 생물막 공정이기 때문에 입자상 물질의 제거가 어렵다. 그래서 Fig. 3의 (a), (b)에서 보는 바와 같이 접촉조와 MBR(membrane bioreactor)이 후단 공정으로 제안되기도 했으며,<sup>23)</sup> Fig. 3의 (c), (d)에서 보는 바와 같이 기존 하폐수 처리공정에 직접 결합하는 방법이 제안되기도 했다.<sup>32)</sup> Fig. 3(c)의 경우는 고도처리 공정의 혐기조에 침지형 단일 미생물 연료전지가 적용된 것으로, 혐기조는 산화전극의 역할을 미생물 연료전지는 환원전극의 역할을 담당한다. Fig. 3(d)의 경우는 활성슬러지 공정의 호기조에 침지형 단일 미생물 연료전지가 적용된 것으로, 미생물 연료전지는 산화전극의 역할을 호기조는 바이



**Fig. 3.** Schematic diagrams of microbial fuel cell (MFC) combined with wastewater treatment process. (a) MFC combined with a solids contact tank, (b) MFC combined with an MBR, (c) MFC submerged into an anaerobic tank, (d) MFC submerged into an aerobic tank.<sup>23,32)</sup>

오환원전극의 역할을 담당한다. 가장 적용성이 좋은 Fig. 3(d)에 대해서 다양한 재료를 가지고 실험한 결과, 흑연직물을 산화전극과 환원전극 모두에 이용했을 때 최고 성능을 나타내었다. 즉, 16.7 W/m<sup>3</sup>의 최대 전력밀도와 17Ω의 최소 내부저항을 얻을 수 있었다.<sup>32)</sup> 하지만 기존의 혐기성소화 공정과 경쟁하기 위해서는 고효율의 저렴한 재료가 지속적으로 개발이 되어 제작비용의 감소와 내부저항의 감소, 그리고 400 W/m<sup>3</sup> 이상의 높은 전력수율을 얻을 수 있어야 한다.<sup>14)</sup>

#### 4. 바이오수소 생산

미생물 연료전지의 구조 및 운전의 간단한 변형에 의해 전기 대신 높은 수율의 수소를 얻을 수 있다. 환원전극에 대한 산소 공급을 중단하고 전기회로에 약간의 전압을 공급하면 환원전극으로부터 수소가 생산되는데, 이것을 MEC(microbial electrolysis cell)라고 한다.<sup>15,17)</sup> 중성 pH에서 물의 전기분해를 위해서는 1.21 V가 외부에서 공급되어야 하지만, 미생물 연료전지를 MEC로 만들기 위해서는 이론적으로 0.11 V를 그리고 실제적으로 약 0.25V를 공급되면 된다.<sup>7,12)</sup> 기존 발효공정에서는 1몰의 글루코오스에서 4몰의 수소가 생성되지만, MEC에서는 1몰의 글루코오스에서 약 8-9몰의 수소가 생성된다.<sup>7)</sup> MEC에서는 환원전극에 대한 산소공급이 없기 때문에, 산화전극으로 산소가 누출되지 않아 효율을 높게 유지할 수 있다.

#### 5. 바이오환원전극을 이용한 오염물의 제거

바이오환원전극을 이용하고, 산소 대신 하폐수나 오염지하수의 질산염을 전자수용체로 이용하면, 질산염을 질소가스로 전환시켜 제거할 수 있다. 글루코오스를 전자공여체로 이용하고 질산염을 전자수용체로 이용하여 실험한 결과, 바이오환원전극의 최대 전력밀도는 37 mW/m<sup>2</sup>로 기존 환원전극의 값보다 1.7배 정도 높은 값을 보여주었다.<sup>33)</sup> 그리고 바이오환원전극을 이용하고, 산소대신 하폐수나 오염지하수의 황산염을 전자수용체로 이용하면, 황산염을 황화수소로 전환시켜 제거할 수 있다. Goldner 등<sup>34)</sup>은 일찍이 황환원균이 적용된 바이오환원전극 미생물연료전지에서 전기발생을 보고하였다. 또한 산업체에서 많이 이용되어 하천과 지하수의 오염물질로 자주 언급되는 유기염소화합물도 미생물연료전지를 이용하여 제거될 수 있다. 과염소산염, TCE 등과 같은 유기염소화합물은 아주 산화된 상태이기 때문에 바이오환원전극의 전자수용체로 사용될 수 있다.<sup>35,36)</sup> Aulents 등<sup>36)</sup>은 TCE(Trichloroethene)를 전자수용체로 이용하여 TCE가 탈염소화됨을 확인하였다.

#### 6. 의료용 생체이식 동력원

생체이식 동력원은 연속적인 전기의 공급이 가능해야 하며, 또한 높은 내구성과 인체적합성을 가져야 한다.<sup>37)</sup> 생체이식 동력원으로서 가장 많이 이용

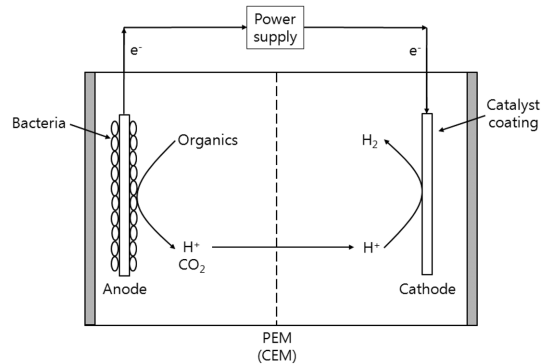


Fig. 4. Concept of microbial electrolysis cell (MEC).

되는 것은 높은 에너지 밀도를 나타내며 안전한 작동이 가능한 리튬 전지이다. 10년 정도 사용이 가능하지만 60% 이상의 환자가 5-8년 안에 교체를 함으로써 외과수술에 의한 고통과 경제적 부담을 안게 된다.<sup>38)</sup> 원자력 전지는 수명이 15년 이상이지만 매우 고가이며 방사능의 위험이 있어 여전히 이용되지 않고 있다.<sup>39)</sup> 인간과 미생물 사이의 친밀한 상호작용을 고려하면 초소형 미생물 연료전지는 연속적이면서도 수명이 길고 안전한 의료용 생체이식 동력원의 대안이 될 수 있으며, 미생물 연료전지의 최적 이식장소는 대장으로 여겨지고 있다.<sup>40)</sup> Du 등<sup>41)</sup>은 대장 배설물의 추출용액을 이용하여 미생물 연료전지가 240 mW/m<sup>2</sup>의 최대 전력밀도를 생산할 수 있음을 보였는데, 이것은 대장에서 미생물 연료전지를 이용하여 전력생산이 가능하며 또한 생체이식형 전력원의 전력기준( $\mu$ W-mW)을 충족하였다.<sup>37)</sup> 그리고 Han 등<sup>40)</sup>은 대장을 모사한 실험조건에서 운전을 하였는데, 미생물 연료전지의 산화전극은 transverse colon에 관모양의 형태로 위치시키고 환원전극은 lumen의 중앙에 위치시킬 수 있다고 가정하였다. 그 결과, 약 2달 이후부터 200시간 이상 안정적인 전기 생산을 보여주었는데 최대 전력밀도는 73.3 mW/m<sup>2</sup>였다.

## VI. 결 론

미생물 연료전지는 전기화학적 활성을 지닌 혐기성 미생물의 촉매작용을 이용하여 유기물에 함유된 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 것이다. 이용되는 산화전극 및 환원전극의 재료는 요구

되는 특성이 매우 유사하여, 탄소 종이, 탄소 천, 흑연 봉, 흑연 직물 등이 양쪽에 모두 적용된다. 하지만 산소환원 반응은 매우 느려서, 이를 극복하기 위해 보통 백금 촉매를 환원전극의 재료표면에 코팅하는 경우가 많다. 전자를 생성하여 세포외부로 전달할 수 있는 미생물을 총칭해서 'exoelectrogen'이라 하며, 주된 미생물은 *Shewanella*, *Geobacter*와 같은 철환원세균으로 생각된다. 하지만 분자생물학적 미생물 군집구조 분석법에 의하면 이들 미생물보다 훨씬 더 많은 미생물이 존재함을 알 수 있다. 이들에 의한 전자전달은 직접 접촉에 의한 전자전달, 전자운반체를 이용한 전자전달, 고전도성 나노와이어를 이용한 전자전달 등이 있다. 그리고 전류가 흐르기 시작하면 다양한 저항들이 전압에 반영되는데, 이로 인해 활성화 저항에 의한 전압손실, 음 저항에 의한 전압손실, 물질전달 저항에 의한 전압손실 등이 발생한다. 미생물 연료전지의 응용은 무인 원격 동력원, BOD 센서, 하폐수 처리, 바이오수소 생산, 바이오환원전극을 이용한 오염물의 제거, 의료용 생체이식 동력원 등으로 매우 다양하다.

## 감사의 글

이 논문은 2011학년도 한국방송통신대학교 국외연수비 지원을 받아 작성되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Grove WR. On voltaic series and the combination of gases by platinum. *Philosophical Magazine and J Sci.* 1839; (XIV): 127-130.
- Potter MC. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proc R Soc London Ser B* 1911; 84: 260-276.
- Cohen B. The bacterial culture as an electrical half-cell. *J Bacteriol.* 1931; 21: 18-19.
- Lewis K. Symposium on bioelectrochemistry of microorganisms: IV. Biochemical fuel cells. *Bacteriol Rev.* 1966; 30(1): 101-113.
- Allen RM, Bennetto HP. Microbial fuel cells: electricity production from carbohydrate. *Appl Biochem Biotech.* 1993; 39-40: 27-40.
- You KS, Song YC. Application of microbial fuel cells to wastewater treatment. *J KSEE* 2009; 31(8): 575-584.
- Du Z, Li H, Gu T. A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnol Adv.* 2007; 25: 464-482.
- Kim BH, Kim HJ, Hyun MS, Park DH. Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *J Microbiol Biotechnol.* 1999; 9(2): 127-131.
- Kim BH, Park DH, Shin PK, Chang IS, Kim HJ. Mediator-less biofuel cell. U.S. 1999; Patent 5976719.
- Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotech.* 2005; 23(6): 291-298.
- Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schroder U, Keller J, Freguia S, Aelterman P, Verstraete W, Rabaey K. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ Sci Technol.* 2006; 40(17): 5181-5192.
- Logan BE, Regan JM. Microbial fuel cells-challenges and applications. *Environ Sci Technol.* 2006; 40(17): 5172-5180.
- Logan BE, Regan JM. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in Biotech.* 2006; 14(12): 512-518.
- Watanabe K. Recent development in microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy. *J Biosci Bioeng.* 2008; 106(6): 528-536.
- Rozendal RA, Hamelers HVM, S, Rabaey K, Keller J, Buisman CJN. Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends in Biotech.* 2008; 26(8): 450-459.
- Rismani-Yazdi H, Carver SM, Christy AD, Tuovinen OH. Cathodic limitations in microbial fuel cells: an overview. *J Power Sources* 2008; 180: 683-694.
- Pham TH, Aelterman P, Verstraete W. Bioanode performance in bioelectrochemical systems: recent improvements and prospects. *Trends in Biotech.* 2009; 27(3): 168-178.
- Logan BE. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nat Reviews/Microbiol.* 2009; 7: 375-381.
- Microbial Fuel Cells homepage. <http://www.microbialfuelcell.org>. 2012.
- Zhou M, Chi M, Luo J, He H, Jin T. An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *J Power Sources* 2011; 196: 4427-4435.
- Song YC, Woo JH, You KS. Materials for microbial fuel cell: electrodes, separator and current collector. *J KSEE* 2009; 31(8): 693-704.
- Lee TH, Yu JC, Choi SJ. Microbial fuel cells using

- biocathodes. *J KSEE* 2009; 31(8): 593-600.
23. Logan BE. Microbial fuel cells. John Wiley & Sons Inc., New York, 2008.
  24. Moon H, Chang IS. Internal resistances in microbial fuel cell and techniques for analysis of internal resistance. *J KSEE* 2009; 31(8): 585-592.
  25. Kim C, Cha J, Choi S, Yu H. Operational conditions and design factors of microbial fuel cell for practical application. *J KSEE* 2009; 31(9): 719-732.
  26. Reimers CE, Tender LM, Fertig S, Wang W. Harvesting energy from the marine sediment-water interface. *Environ Sci Technol.* 2001; 35(1): 192-195.
  27. Tender LM, Reimers CE, Stecher HA, Holmes DE, Bond DR, Lowy DA, Pilobello K, Fertig SJ, Lovely DR. Harnessing microbially generated power on the seafloor. *Na Biotechnol.* 2002; 20(8): 821-825.
  28. Ringeisen BR, Henderson E, Wu PK, Pietron J, Ray R, Little B, Biffinger JC, Jones-Meehan JM. High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Environ Sci Technol.* 2006; 40(8): 2629-2634.
  29. Chang IS, Jang JK, Gil GC, Kim M, Kim HJ, Cho BW. Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor. *Biosens Bioelectron.* 2004; 19: 607-613.
  30. Kim BH, Chang IS, Gil GC, Park HS, Kim HJ. Novel BOD sensor using mediator-less microbial fuel cell. *Biotechnol Lett.* 2003; 25: 541-545.
  31. Kang KH, Jang JK, Pham TH, Moon H, Chang IS, Kim BH. A microbial fuel cell with improved cathode reaction as a low biochemical oxygen demand sensor. *Biotechnol Lett.* 2003; 25: 1357-1361.
  32. Cha J, Choi S, Yu H, Kim H, Kim C. Directly applicable microbial fuel cells in aerobic tank for wastewater treatment. *Bioelectrochem.* 2010; 78: 72-79.
  33. Tran HT, Kim DH, Oh SJ, Rasool K, Park DH, Zhang RH, Ahn DH. Nitrifying biocathode enables effective electricity generation and sustainable wastewater treatment with microbial fuel cell. *Water Sci Technol.* 2009; 59(9): 1803-1808.
  34. Goldner BH, Otto LA, Canfield JH. Application of bacteriological processes to the generation of electrical power. *Develop in Industrial Microbial.* 1963; 4: 70-80.
  35. Shea C, Clauwaert P, Verstraete W, Nerenberg R. Adapting a denitrifying biocathode for perchlorate reduction. *Water Sci Technol.* 2008; 58(10): 1941-1946.
  36. Aulenta F, Canosa A, Majone M, Panero S, Reale P, Rossetti S. Trichloroethene dechlorination and H<sub>2</sub> charge utilization by a dechlorinating culture in a bioelectrochemical system. *Environ Sci Technol.* 2008; 42(16): 6185-6190.
  37. Szczyzny S, Jetzki S, Leonhardt S. Review of Current Actuator Suitability for Use in Medical Implants. Proc. the 28th IEEE EMBS Annual International Conference, New York City, USA, 2006; 5956-5959.
  38. Orhan S. Power sources for implantable medical devices. *Device Technol Appl Electron.* 2002; 18: 76-79.
  39. Drews J, Fehrmann G, Staub R, Wolf R. Primary batteries for implantable pacemakers and defibrillators. *J Power Sources* 2001; 97-98: 747-749.
  40. Han Y, Yu C, Liu H. A microbial fuel cell as power supply for implantable medical devices. *Biosens Bioelectron.* 2010; 25: 2156-2160.
  41. Du F, Li Z, Yang S, Xie B, Liu H. Electricity generation directly using human feces wastewater for life support system. *Acta Astronaut.* 2011; 68(9): 1537-1547.