

실용적 적용을 위한 미생물연료전지의 운전 조건과 설계 인자

Operational conditions and design factors of microbial fuel cell for practical application

김창원 † · 차재환 · 최수정 · 유하나
 Changwon Kim † · Jaehwan Cha · Soojung Choi · Hana Yu

부산대학교 사회환경시스템공학과
 Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

1. 서론

인구 증가와 이로 인한 경제활동의 급격한 증가는 전 지구적 '에너지 위기'를 초래하였으며, 이미 석유와 관련한 국제적 자원 확보경쟁이 가시화되고 있다. 인간이 소비하는 에너지, 식량, 주택, 도로 등을 만들기 위해 자원을 생산하고 폐기물을 처리하는 데 드는 비용을 토지로 환산한 '생태발자국지수(ecological footprint)'를 살펴보면,¹⁾ 2008년을 기준으로 한국은 3.7 ha로 지구가 감당할 수 있는 수준인 1.8 ha를 크게 상회하고 있다(Fig. 1). 이것은 한국이 현재의 생활방식을 유지할 경우 약 2개의 지구가 필요함을 의미하여, 특히 에너지와 자원의 상당수를 수입에 의존하는 취약적 상황을 고려할 때 그 심각성을 절실히 깨달을 수 있다. 에너지 위기의 상황에 설상가상으로 겪고 있는 또 하나의 문제는 환경오염과 이로 인한 기후 변화이다. 기후 변화에 대한 문제점과 대응 방안을 모색하기 위하여 조직된 국제기구 IPCC (intergovernmental panel on climate change)의 보고서^{2,3)}에 따르면 21세기 동안 약 2~4℃의 가속화된 지구 온난화가 예상되며, 강경한 대응이 없다면 자연환경과 인간사회가 심각한 영향을 받을 것

로 전망하였다.

이렇듯 이 시대가 안고 있는 자원 및 에너지 고갈, 기후변화 및 지구온난화 등의 문제는 전통적인 환경·에너지기술의 불가피한 변화를 촉구하였다. 발생한 폐기물의 처리에만 치중하였던 1세대 환경기술인 '사후처리기술(end-of-pipe technology)'은 환경 친화적인 '청정기술(clean technology)'로 진보하였고, 환경공학과 바이오공학의 협력적 성장은 이미 오염된 환경을 이전의 상태로 복구할 수 있는 '환경복원 및 재생기술(regeneration technology)'로 발전하게 되었다. 에너지 기술 또한 과거에는 화석연료와 같은 소위 재생불가능자원(non-renewable resource)의 추출, 개질, 연료화에 치우쳤다면, 근래에는 수력, 풍력, 태양력 등과 같은 재생가능자원(renewable resource)의 생산에 막대한 연구 개발이 이루어지고 있다. 환경오염 제어기술과 접목하여 최근에는 자연 생태계의 원리인 물질 및 에너지 순환흐름을 인간사회에 적용한 자원순환형 시스템의 구현이 지속가능한 발전의 대안으로 떠오르고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위한 기술을 '녹색기술(green technology)' 혹은 '산업생태 기술(industrial ecology technology)'이라 부르기도 한다. 천연자원의 소비를 억제하면서 환경부하 또한 저감할 수 있는 이 시스템에서 주목할 점은 순환자원이다. 순환자원은 폐기물로부터 추출된 유용한 자원을 의미하며, 폐기물이 새로운 에너지 혹은 물질의 원천으로 활용된다.

미생물연료전지(MFC, microbial fuel cell)는 생명과학과 환경바이오공학의 비약적 발전으로 탄생한 대표적 자원순환형 시스템이다. 미생물연료전지는 폐수 내 존재하는 유·무기물의 잠재된 화학 에너지를 생촉매 전기화학반응을 이용하여 직접 전기 에너지로 전환한다.^{4~7)} 일반적으로 화학연료전지(chemical fuel cell)에 공급되는 수소는 화석연료의 개질에 의하거나 혹은 물의 전기분해에 의해 얻어질 수 있으며,

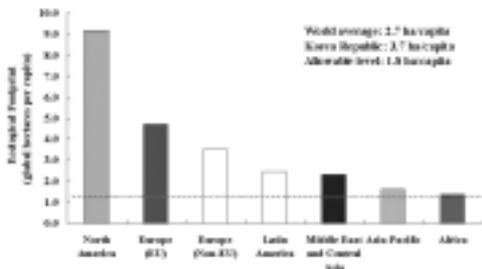


Fig. 1. Global ecological footprints depending on region which are expressed as a land site that were converted from the costs used for resource production and waste treatment to provide energy, food, house and roads, etc.

† Corresponding author : E-mail : cwkim@pnu.kr Tel : 051-510-2416 Fax : 051-515-5347

이 과정에서 이미 불가피하게 자원 혹은 에너지를 소모한다. 하지만 미생물연료전지는 가치가 없다고 여겨진 폐수 내 유·무기물질로부터 새로운 에너지를 발생시킨다. 게다가 그 자체가 처리의 대상인 유·무기성 오염물질이 미생물에 의한 생물전기화학적 산화 또는 환원반응을 거쳐 환경에 무해한 물질로 전환되기 때문에 전통적인 생물학적 하·폐수 처리의 역할도 동시에 수행하게 된다.

미생물연료전지는 1912년 Potter⁸⁾가 *Escherichia coli*와 *Saccharomyces*를 이용하여 전기 에너지를 생산할 수 있음을 밝혀낸 것이 최초의 계기가 되었으나, 극히 작은 전기 발생과 전자전달에 대한 메커니즘의 이해 부족으로 인하여 이렇다 할 주목을 받지 못했다. 하지만 1980년대에 Allen과 Bennetto⁹⁾가 전자매개체(electron mediator)를 주입하여 미생물과 전극 사이의 전자전달을 및 이로 인한 발생 전류밀도를 크게 향상시키면서, 미생물연료전지는 새로운 조명을 받게 되었다. 그러나 일부 전자매개체가 가지는 환경적 유독성과 매개체를 연속적으로 주입해야만 하는 원천적인 한계는 미생물연료전지의 실용적 적용을 크게 제한하였다. 이러한 난제는 1999년 Kim 등¹⁰⁾이 철환원균인 *Shewanella putrefaciens*가 인공적인 전자매개체의 도움 없이 세포 체내에서 발생한 전자를 세포 체외의 불용성 전극으로 직접 전달한다는 사실을 밝힘으로써 해결되었으며, 이 발견으로 미생물연료전지의 연구 개발이 획기적인 전기를 맞이하게 되었다.

최근 10여년 사이에 미생물연료전지에 대한 관심은 가히 폭발적으로 증가하였으며, 미생물연료전지의 전자전달 기작 이해, 전기화학적 활성을 가지는 다양한 미생물 동정, 생물전기화학적 반응 속도 및 손실 해석 등 다양한 과학적 접근에서부터 설계 및 구조의 개선, 전극 및 막 소재의 최적화, 규모 확대와 같은 공학적 접근에 이르기까지 광범위한 연구 개발이 전 세계적으로 진행되어 왔다. 이러한 노력들은 미생물연료전지가 생산할 수 있는 전력 밀도(power density)가 불과 수 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ 에서 무려 수 kW/m^2 의 수준으로 증가하게 하였다.¹¹⁾ 비록 미생물연료전지가 발생할 수 있는 전력량이 여전히 화학연료전지의 전력량 발생 범위보다 1/1000~1/100 정도로 작지만,¹²⁾ 최근의 기술적 진보는 불가능해 보였던 전력량의 차이를 상당히 좁혔다.¹³⁾ 더욱이 미생물연료전지가 수소와 같은 고열량 연료가 아닌 폐수 등을 사용한다는 점을 고려한다면 이러한 발전과정과 그 잠재력은 실로 대단하다고 볼 수 있다.

생촉매 반응(bio-catalytic reaction)에 의해 다양한 유·무기성 물질로부터 전기 에너지를 회수할 수 있는 기술은 미생물연료전지가 폐수처리뿐만 아니라 바이오센서,^{14~16)} 바이오수소 생산,^{17~19)} 무인 동력원^{20,21)} 등 다양한 분야로 응용하게 만들었

다. 가장 최근에는 미생물연료전지의 연구가 실험실 규모에서 수 리터 혹은 수 톤의 파일릿 규모로 확대되면서^{22,23)} 일부 학자들은 수 년 내에 미생물연료전지의 실용화가 이루어질 것으로 전망하고 있다. 하지만 미생물연료전지가 실제 현장에 적용되기 위해서는 규모 확대의 과정에서 발생할 수 있는 다양한 문제점들을 해결해야 한다. 따라서 본 총론에서는 미생물연료전지의 전자전달 메커니즘을 비롯한 기본적인 구동원리를 소개하고, 지금까지 밝혀진 미생물연료전지의 성능 및 적용 제한인자들을 운전 조건과 설계 인자로 구분하여 종합적으로 기술함으로써, 향후 미생물연료전지가 극복해야 할 과제와 그 방향을 제시하고자 한다.

2. 미생물연료전지의 구동원리와 성능 제한 인자

2.1. 미생물연료전지의 구동원리

일반적으로 미생물연료전지의 연료원은 생물학적으로 분해 가능한 유기물질이며, 이들은 수소처럼 전기화학적으로 활성을 가지지 못하기 때문에 화학연료전지의 연료로는 사용될 수 없다. 하지만 미생물은 이러한 유기물질로부터 전자를 방출시키고 전기화학적 활성을 가지는 다양한 전자 전달체(electron carrier)로 이들을 전달할 수 있다. 미생물연료전지에서 유기물의 생분해는 혐기성 상태로 운전되는 산화전극부(anode compartment)에서 일어나며, 이러한 기질 산화 과정에서 발생한 수소이온과 전자는 각각 이온교환막(ion exchange membrane)과 외부회로(external circuit)를 통해 환원전극부(cathode compartment)로 이동하여 산소와 같은 전자수용체와 결합함으로써 물을 형성한다. 이온교환막은 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)을 분리함으로써 환원전극부에서 산화전극부로의 산소 확산을 차단하고, 동시에 유기물의 산화과정에서 방출된 수소이온이 산화전극부에서 환원전극부로 이동하는 통로로 사용된다.

미생물연료전지는 일차적으로 기질이 가지는 화학 에너지를 전기화학적 산화가 쉬운 형태로 전환하고, 이 후 전기 에너지로 전환한다. 앞 단계는 산화전극부 내 미생물의 대사반응(metabolism, 보다 엄밀히 말하면 이화작용 catabolism) 및 미생물과 전극 간의 전자전달에 의해 이루어진다. 뒤 단계는 산화전극부와 환원전극부를 분리하고 산화전극과 환원전극을 오직 전선으로만 연결하여 최종 환원반응이 환원전극부에서만 일어나도록 함으로써 이루어진다. 미생물연료전지를 포함한 생물전기화학시스템(bioelectrochemical system)에서 전극과 같은

금속물질에 전자를 주거나 혹은 전자를 받을 수 있는 미생물을 전기화학활성박테리아(electrochemically active bacteria)로 통칭한다. 특별히 미생물연료전지에서는 세포 체내의 유기물 산화과정에서 발생한 전자를 세포 체외의 불용성 전극(즉, 산화 전극)으로 전달할 수 있는 박테리아를 *exoelectrogen*으로 명명한다.²⁴⁾ 대표적인 *exoelectrogen*으로 금속염 환원균에 속하는 *Geobacter*, *Shewanella*, *Rhodospirillum rubrum* 종이 있으며, 이들은 세포와 전극의 물리적 접촉에 의한 직접적 전자전달(direct electron transfer)이나 혹은 산화환원 매개체(redox mediator)에 의한 간접적 전자전달(indirect electron transfer)을 통해 산화전극을 전자수용체로 활용한다.

2.2. 생물전기화학적 반응에서의 에너지 손실

닫힌회로(closed circuit)에서 운전되는 미생물연료전지의 실제 셀 전압(cell voltage)은 열린회로에서의 전압(open circuit voltage)에 비해 낮다. 왜냐하면 전류가 흐르기 시작하면서 발생하는 다양한 저항들이 셀 전압에 반영되기 때문이다. 따라서 미생물연료전지의 성능을 최적화하기 위해서는 전류 발생을 제한하는 다양한 저항의 특징과 크기를 명확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 미생물연료전지의 생물전기화학적 반응에서의 에너지 손실(energy loss)은 크게 옴 저항(ohmic loss), 활성화 손실(activation overpotential), 농도 손실(concentration loss) 및 전하 손실(coulombic loss)로 구분한다.²⁵⁾

옴 저항은 전극과 도선을 통한 전자의 이동에서 발생하는 손실과 전해질을 통한 이온의 이동에서 발생하는 손실로 나뉜다. 전자의동에 의한 손실은 주로 전극, 도선(wire), 집전체(current collector)의 종류나 연결 방법 등에 따라 달라지며, 이온이동에 의한 손실은 멤브레인의 종류 및 크기, 전해질(electrolyte)의 종류 및 전기 전도도(electric conductivity), 전극 간 거리 등에 따라 달라진다.

활성화 손실은 산화환원반응이 일어나기 위해 요구되는 활성화 에너지로 인해 발생하며, 주로 발생 전류량이 낮은 경우에 중요한 성능 제한인자로 작용한다. 미생물연료전지에서는 산화전극부 내에서도 생물전기화학반응으로 인한 활성화 손실이 발생하지만, 환원전극부에서의 산소 환원반응이 활성화 손실의 많은 부분을 차지한다. 따라서 많은 연구자들이 환원전극부의 활성화 에너지를 줄이기 위해 백금 등과 같은 화학 촉매(chemical catalyst)를 사용하기도 하며, 최근에는 시스템의 경제성과 지속가능한 적용을 고려하여 생 촉매(bio-catalyst)를 활용한 시스템도 제안되고 있다.

농도 손실은 전극 근처에서 반응물과 생성물의 농도 구배

(concentration gradient)에 의해 영향을 받는다. 반응물은 반응에 필요한 양이 부족하지 않게 빠르게 전달되어야 하지만, 산화전극으로의 기질 혹은 영양염류의 전달이나 환원전극으로의 수소이온 및 최종전자수용체의 전달이 불충분하면 시스템의 성능을 제한한다. 전극 표면에서 발생한 생성물 또한 빠르게 이동되어야 하는데, 가령 산화전극의 생물막 내에서 발생한 수소이온이 빠르게 이동하지 않고 축적되면 국부적인 pH 강하를 야기하며 이는 미생물의 활성을 저해할 수 있다.

전하 손실은 대개 산화전극부에서 일어나며, 공급된 기질에 내재되어 있는 전자의 전부가 전극으로 전달되지 못하고 일부가 다른 물질로 이동하기 때문에 발생한다. 이것은 일차적으로 산화전극부 내에서 기질이 완전히 제거되지 못하고 유출수로 빠져나가서 발생할 수 있으며, 이 외에도 전류 생성과 관련 없는 다른 반응에 의해서 일어날 수도 있다. 가령 기질이 발효나 혹은 혐기성 호흡(anaerobic respiration)에 의하여 수소와 같은 다른 물질로 전환되거나, 미생물의 생합성(anabolism) 등에 전자가 소모됨으로써 전하 손실을 야기할 수 있다. 게다가 때에 따라서 환원전극부의 산소가 멤브레인을 통해 산화전극부로 확산됨으로써 유기물의 일부가 호기성 호흡(aerobic respiration)에 의해 산화될 수 있으며, 이 또한 전하손실의 원인 중 하나이다.

3. 에너지 손실 최소화를 위한 운전 조건의 제어 전략

3.1. 기질 종류에 따른 생분해 특성 및 전기화학적 성능

3.1.1. 순수 기질

미생물연료전지에서 생물전기화학적 반응은 유입된 기질을 이용한 미생물의 대사작용에서 시작한다. 따라서 기질의 종류는 미생물의 생장 및 활성을 좌우하는 가장 핵심적인 인자이다. 특히 혼합균(mixed culture)이 식용된 미생물연료전지의 경우 기질과 미생물의 종류에 따라 대사과정과 대사산물이 달라지기 때문에 미생물연료전지 내에서 각 기질의 생분해 특성과 이에 따른 전기화학적 셀 성능을 이해하는 것은 매우 중요하다. Min 등²⁶⁾은 acetate, starch, glucose, dextran, butyrate를 사용하여 각 기질에 대한 미생물연료전지의 셀 전압(cell voltage), 최대 전력밀도(maximum power density), 쿨롱 효율(C.E., coulombic efficiency) 등을 평가하였다. 그들은 acetate가 주입된 미생물연료전지가 309 mW/m²의 가장 높은 최대 전력밀도를 보였으며, 쿨롱 효율 또한 비발효성(nonfermentable) 기질인 acetate와 butyrate은 각각 65, 50%인 반면에 발효성

Table 1. Distribution of electron equivalents in the MFCs at the end of the batch experiments²⁸⁾

	Glucose-fed MFC		Acetate-fed MFC	
	COD [mg]	Fraction [%]	COD [mg]	Fraction [%]
Initial COD	103	100	115	100
Final SCOD	19	18	12	11
Current	50	49	82	71
Biomass _{suspended}	10	10	6	5
Biomass _{attached}	17	16	12	10
CH ₄ gas	3.8	3.7	not detected	-
H ₂ gas	not detected	-	not detected	-
Unknown	3.2	3	3.0	2

(fermentable) 기질인 glucose, dextran, starch는 14, 17, 21%로 낮았다고 보고하였다. 이것은 발효성 기질의 일부가 전기 발생과 관련되지 않은 biohydrogen 생성 등으로 사용되면서 나타난 대사과정 상의 전자손실(electron sink)로 판단된다. 많은 연구자들이 이와 유사한 결과를 보고하였으며,^{27~33)} 최근에 Lee 등²⁸⁾은 미생물연료전지의 기질로 glucose와 acetate를 사용하였을 때 대사산물 및 최종산물을 분석하여 전자 평형식(electron equivalent balance)을 보고하였다(Table 1). 유입 기질 중 전기로 전환된 비율은 glucose와 acetate가 각각 49, 71%로 나타났으며, glucose가 주입된 경우에는 미생물 생체량(biomass)과 메탄 생성으로 29.7%의 전자가 전달된 반면, acetate가 주입된 경우는 미생물 생체량으로 불과 15%의 전자가 전달되었고 메탄은 생성되지 않았다. 이 결과는 발효성 기질이 주입될 경우 메탄균(methanogen)과 같은 발효균들의 성장 및 대사과정에 상당한 전자 손실이 발생하며, 때에 따라서는 exoelectrogen과 발효균과의 경쟁적 관계가 전기 발생에 부정적 영향을 미칠 수도 있음을 시사한다. Chae 등³⁰⁾은 acetate,

butyrate, propionate, glucose를 사용할 때 미생물연료전지의 산화전극조 내 우점 미생물을 동정하였다. 이 연구에서는 glucose에 비해 acetate를 사용한 경우 δ-proteobacteria가 차지하는 비율이 18%에서 31.7%로 높게 나타났으며, δ-proteobacteria의 대다수는 대표적인 exoelectrogen으로 알려진 *Geobacter* 종임을 밝혔다. Catal 등³²⁾은 목질계 바이오매스를 구성하는 다양한 당당류를 이용하여 직접적인 전기 생산을 확인하였으며, 이 중 glucuronic acid는 2,770 mW/m²의 높은 최대 전력밀도를 낸다고 보고하였다.

3.1.2. 실제 폐수

최근에 들어 많은 연구자들이 실제 폐수(real wastewater)를 대상으로 미생물연료전지의 적용 가능성을 평가하였다(Table 2).^{26,34~46)} 이들은 도시하수뿐만 아니라 축산폐수, 산업폐수 등 다양한 폐수를 대상으로 연구하여 미생물연료전지의 응용 분야를 확대하였다. Nam 등³⁵⁾은 커피 공장에서 배출되는 발효폐수(fermented wastewater)를 기질로 사용하여 acetate를 주입한 경우와 비교하였다. 1.92 g COD/L · d의 동일한 유기물 부하에서 acetate가 주입된 경우 최대 전력밀도는 3,664 mW/m³인 반면에 발효폐수에서는 1,884 mW/m³의 전력 밀도가 나타났다. 발효폐수의 유입 부하를 3.84 g COD/L · d로 증가시키자 전력밀도가 2,981 mW/m³으로 나타났으며, 유입 부하를 적절히 조절하면 순수기질에 상당하는 높은 전력을 얻을 수 있음을 제안하였다. 한편, Greenman 등³⁶⁾은 매립장 침출수(landfill leachate)를 미생물연료전지의 기질로 사용하였다. 이 연구에서는 침출수 내 풍부한 유기물이 존재함에도 불구하고 0.19 mW/m²의 낮은

Table 2. Characteristics of MFCs using various real wastewater in previous studies

Operation mode	Source of wastewater	COD loading rate[kg/m ³ · d]	COD _{in} [mg/L]	COD removal efficiency[%]	Coulombic efficiency[%]	Power density [mW/m ²]	Ref. No.
Continuous mode	Beer brewery wastewater	7.0	626	42.8	-	264	32)
	Fermented wastewater	3.8	-	93.0	0.44	2.9 ^a	33)
	Landfill leachate	2.9 ^b	572 ^c	8.2	-	0.19	34)
	Rich vegetable products	1.3	-	-	62	23 ^a	35)
	Urban wastewater	-	330	54.5	-	24	36)
	Domestic wastewater	3.7	299	71.0	18.4	103	37)
	Domestic wastewater	-	246	42	-	72	24)
Batch mode	Acidogenic domestic wastewater	-	420	66.6	51.59	125	38)
	Chemical wastewater	-	5900	47.8	14.42	13	39)
	Starch Processing wastewater	-	4,852	98.0	7.0	239	40)
	Chocolate industrial wastewater	-	1459	74.8	-	4 ^d	41)
	Paper recycling wastewater	-	1,464 ^e	73.0	16.0	501	42)
	Swine wastewater	-	8,270	84	-	228	43)
	Brewery wastewater	-	2,250	85	8.9	155	44)

^a Based on Power density per unit volume(W/m³), ^b Based on kg BOD/m³ · d), ^c Based on mg BOD/L, ^d Based on current(mA), ^e Based on TCOD(mg TCOD/L)

전력밀도와 8.2%의 낮은 COD 제거율을 기록하였다. 이것은 일반적으로 침출수가 난분해성 유기물질을 다량 포함하고 있다⁴⁷⁾는 사실과 무관하지 않다. Clauwaert 등³⁷⁾은 식물성 성분(glycerol)이 풍부한 폐수를 기질로 이용하는 생물환원전극 미생물연료전지(bio-cathode MFC)로부터 23 W/m³의 전력 밀도와 62%의 쿨롱 효율을 얻었다. 이는 합성 glycerol를 사용한 미생물 연료전지(평균 전력밀도 26 W/m³, 평균 쿨롱효율 65%) 결과와 비슷한 수준이다. 또한 환원전극에 화학촉매 대신 생촉매를 도입하여 시스템의 경제성을 개선하였다. Raghavulu 등⁴¹⁾은 제약 및 염료공장에서 배출되는 화학제품 폐수를 산성, 중성, 염기성으로 pH를 달리하여 주입하였으며, pH 6의 산성을 띤 폐수에서 가장 높은 최대 전력밀도(12.7 mW/m²)를 나타냈다고 보고하였다.

3.2. 운전조건에 의한 내부저항 및 셀 성능 변화

3.2.1. 이온강도 및 완충세기

일반적으로 연료전지에서 전해질의 전기전도도(conductivity)는 이온의 전달에 지배적인 영향을 미치는 인자이며, 미생물연료전지에서 또한 기질 혹은 산화·환원전극조 내 용액의 이온강도(ion strength)가 이온이동에 따른 옴 저항에 가장 큰 영향을 미친다. Liu 등⁴⁸⁾은 NaCl을 이용하여 산화전극조 내 이온강도를 100 mM에서부터 400 mM까지 조절하여 미생물연료전지의 성능을 관찰하였다. 이온 강도가 증가함에 따라 내부저항이 감소하였으며, 전력밀도 또한 720 mW/m²에서 1,330 mW/m²로 증가하였다. 하지만 과도한 NaCl 사용은 미생물의 생장에 제한인자로 작용하고 수소이온교환막의 성능을 저해하는 등의 문제점이 발생할 수 있다.^{49,50)} You 등³⁹⁾은 도시하수의 이온강도를 높이기 위하여 인위적으로 NaCl 농도를 첨가하였으며, 전체 중 NaCl의 질량비율을 2.4%로 증가하였을 때 전력밀도가 103 mW/m²에서 173 mW/m²로 크게 증가한다고 보고하였다.

전해질에서 이온강도와 함께 고려되어야 할 중요한 인자는 완충세기이다. 미생물연료전지에서는 완충세기가 pH 변화로 인한 미생물 활성도 감소를 경감시키고, 직접적으로 수소이온의 이동 및 전달에 관여하기도 한다. Torres 등⁵¹⁾은 인산염 완충용액(phosphate buffer solution)의 농도를 달리하여 미생물연료전지의 전류 발생을 비교하였으며, 완충용액의 짝산(conjugate acid)과 짝염기(conjugate base)가 산화전극의 생물막에서 발생하는 수소이온을 전달하는 운반체(carrier)로 작용한다고 제안하였다. 완충용액의 농도가 12.5 mM일 때 2.2 A/m²이었던 전류밀도가 100 mM의 완충용액을 사용하였을 때 9.3 A/m²로 크게 증가한 반면에 NaCl의

Table 3. Cell performance under the different temperature

Ref. No.	Temp. [°C]	Power density [mW/m ²]	Coulombic efficiency[%]	COD removal efficiency[%]
50)	8-22	1.4 ^a	5	59
	20-35	0.7 ^a	1.5	90
51)	10	15.6 ^b	-	-
	20	35.9 ^b	-	-
	30	52.6 ^b	-	-
52)	22	43	8	-
	30	70	43	-
44)	20	170	8.9	85
	30	205	10	87
45)	20	660	17-45	-
	32	720	25-46	-

^a Based on current(mA), ^b Based on current density per unit area(mA/m²)

농도를 0에서 100 mM로 증가하였을 때에는 전류밀도가 불과 15% 증가하였다고 보고하였다. 최근에 Feng 등⁴⁶⁾은 맥주공장의 실 폐수에 200 mM의 인산염 완충용액을 첨가함으로써 전력밀도가 158% 증가하였다고 보고하였으나, 추가적인 완충액의 주입은 대규모의 현장 적용이나 비용 문제 등을 고려할 때 바람직한 대안은 아니다.

3.2.2. 운전 온도

고온에서 운전되는 화학연료전지와 달리 미생물연료전지는 *exo-electrogen*이 생존할 수 있는 넓은 온도범위에서 운전이 가능하다. 하지만 운전온도는 전기화학적 반응속도뿐만 아니라 미생물의 활성도에도 크게 영향을 미치므로 미생물연료전지에서 고려해야 할 운전조건 중 하나이다. Table 3에는 여러 연구자들이 운전온도가 미생물연료전지의 성능에 미치는 영향을 평가한 결과들을 요약하였다.^{46,48,52~54)} Min 등⁵⁴⁾은 운전온도를 22°C에서 30°C로 증가시키자 전력밀도가 43 mW/m²에서 70 mW/m²으로 163% 향상하였으며, 쿨롱효율 역시 8%에서 43%로 증가한다고 보고하였다. 온도에 따른 전력밀도 증가는 다른 연구자들에게도 유사하게 관찰되었으나,^{53,46,47)} Jadhav와 Ghangrekar⁵²⁾의 연구에서는 오히려 온도가 증가할 때 유기물 제거는 향상되었으나 전기 발생은 감소한다고 보고하였다. 그들은 이 이유에 대해 고온에서 *methanogen*의 성장이 증가하므로 이들의 대사반응이 전자 손실과 함께 유기물 제거의 증가를 야기하였다고 설명하였다. 이 결과는 역으로 생각하면 *exo-electrogen*은 낮은 온도에서도 충분히 활성을 유지함을 의미한다. 일반적으로 물 1 m³을 1°C 증가시키기 위해서는 약 11.6 kWh의 에너지가 소요되며, 따라서 운전온도에 의한 비용적 손실 혹은 이득을 충분히 고려해야 한다.

3.2.3. 혼합 강도

미생물연료전지에서 적절한 혼합강도는 생물막으로의 기질 및 영양염류 전달, 전해질 내 이온의 이동, 환원전극으로의 전자 수용체 전달을 원활하게 하며, 셀 성능과 직결되는 인자이다. 일반적으로 회분식 운전에서는 교반속도가, 그리고 연속식 운전에서는 수리학적체류시간(hydraulic retention time, HRT)이나 송풍유량이 혼합강도를 결정한다. 특히 수리학적체류시간은 폐수처리의 측면에서 유기물 제거효율과 함께 공정의 설계 및 운전조건을 결정하는 핵심 변수이다. You 등³⁹⁾은 기체상의 산소를 전자수용체로 이용하는 공기환원전극 미생물연료전지(air-cathode MFC)를 대상으로 수리학적체류시간을 달리하였을 때 전력 발생과 유기물 제거효율을 평가하였다. 체류시간이 2시간일 때에는 약 0.346 V의 안정적인 셀 전압을 보였지만, 체류시간이 10, 15, 30 시간으로 증가하자 셀 전압이 매우 불안정하게 발생하였다. 하지만 유기물 제거효율은 2시간 일 때 71%인 반면, 30시간 일 때 91.5%로 증가하였으며, 적절한 체류시간을 선택하기 위해서는 전력 생산과 유기물 제거효율을 동시에 고려해야 한다는 것을 시사하였다. Chen 등⁵⁵⁾은 양 전극조 미생물연료전지에 표면적이 넓은 흑연 알갱이를 전극으로 사용하고 연속적으로 기질을 주입하였으며, 원활한 유체흐름을 위하여 환원전극조의 유출수 중 일부를 유입수로 순환시켰다. 환원전극조의 순환 유량(recirculation rate)을 1.3 mL/min에서 52 mL/min로 증가시키자 셀 전압 또한 22 mV에서 32 mV로 크게 증가하였으나, 순환 유량이 52 mL/min 이상으로 크게 증가하자 오히려 셀 전압이 다소 감소하였다. 그들은 미생물연료전지의 성능을 향상시키기 위해서는 충분한 혼합강도가 요구되며, 지나친 혼합강도는 오히려 생물막의 탈착 및 유실(wash-out)을 유발하거나 미생물에 의해 생성된 전자 매개체의 유실을 유발할 수 있다고 주장하였다. 최근에 Cha 등⁵⁶⁾은 호기조에 직접 침지할 수 있는 단일 전극조 미생물연료전지(submersible single chamber MFC)를 고안하였으며, 호기조의 송풍유량이 0에서 10 L/min으로 증가함에 따라 전력 밀도가 30에서 200 mV 이상으로 크게 증가한다고 보고하였다. 그들은 환원전극에서의 산소환원 반응이 호기조 벌크용액(bulk solution) 내의 용존산소 농도보다 혼합강도에 의한 환원전극으로의 산소 전달에 보다 지배적인 영향을 받는다는 사실을 밝혀냈다.

3.2.4. 외부저항

외부저항(external resistance)은 산화전극과 환원전극 간의 전위차를 유발하며, 그 크기에 따라 전류의 세기가 달라지

는데 이들의 관계는 옴의 법칙(Ohm's law)을 따른다. 흔히 미생물연료전지를 평가하기 위해서 분극곡선(polarization curve)을 사용하며, 이 분극곡선은 외부저항을 달리하였을 때의 셀 전압을 전류 세기에 따라 나타낸다. 분극곡선의 셀 전압은 전력 혹은 전력밀도로 환산할 수 있으며, 이 때 얻어지는 전력 곡선(power curve)은 대개 특정 외부저항에서 최대의 값을 가진다. 따라서 미생물연료전지가 동일한 조건에서 충분한 전력을 생산하기 위해서는 외부저항의 크기를 최적화해야 한다. Hong 등⁵³⁾은 퇴적물 미생물연료전지(sediment MFC)의 외부저항을 10, 100, 1000 Ω 로 달리 운전하였을 때 운전 초기에는 낮은 외부저항에서 더 높은 전류가 발생하였으나, 약 20~40일 사이의 연속운전 동안에는 전류밀도의 차이가 크게 없었다고 하였다. 하지만 최대 전력 밀도(max. power density)는 1000 Ω 의 높은 외부저항에서 오히려 가장 높게 나타났다. 이것은 전력이 전압과 전류의 곱으로 계산되며, 저항의 증가로 인하여 감소된 전류 값에 비해 전압의 증가량이 훨씬 컸기 때문에 높은 저항에서 전력밀도가 증가한 것이다. 이와는 다르게, Aelterman 등⁵⁷⁾은 양 전극조 미생물연료전지를 연속적으로 운전하면서 외부저항을 단계적으로 50, 20, 15 Ω 로 감소시켰을 때 발생 전류량과 전력이 모두 크게 증가함을 관찰하였다. 이들은 유기물 부하가 높은 상황에서는 미생물에 의해 생성되는 전자의 양이 충분하여 외부저항이 작아질수록 전체적인 전류 발생량 또한 증가한다고 주장하였다. 일반적으로 외부저항은 미생물연료전지가 가지는 내부저항과 가까운 값을 가질수록 전체적인 전류 밀도 혹은 전력 밀도가 향상되며, 최근 한 연구자는 내부저항의 변화를 실시간으로 감지하여 이를 외부저항 값 조절에 반영하는 알고리즘을 제안하기도 하였다.⁵⁸⁾

3.2.5. pH

미생물연료전지에서 pH는 미생물의 활성과 수소이온의 전달에 밀접한 관련을 가진다. Jadhav와 Ghangrekar⁵²⁾은 인산염 완충액을 조절하여 합성폐수의 pH를 7.5, 7, 6.5, 6, 5.5로 달리하고 환원전극조에는 pH를 7로 일정하게 유지하였다. 발생 전류는 pH가 6.5일 때 가장 높았으며, pH가 7 이상 혹은 6 이하일 때는 오히려 감소하였다. 또한 쿨롱효율은 pH가 증가할수록 감소하였는데, 이것은 산화전극조와 환원전극조의 pH 구배가 작아짐에 따라 수소이온의 이동이 약해졌기 때문이라고 추측하였다. 일반적으로 미생물연료전지의 산화전극조 내에서는 미생물의 기질 생분해로 인한 수소이온의 생성속도가 전해질 및 막을 통한 수소이온의 이동속도에 비해 빠르기 때문에 생물막에서의 수소이온 축적과 이로 인한

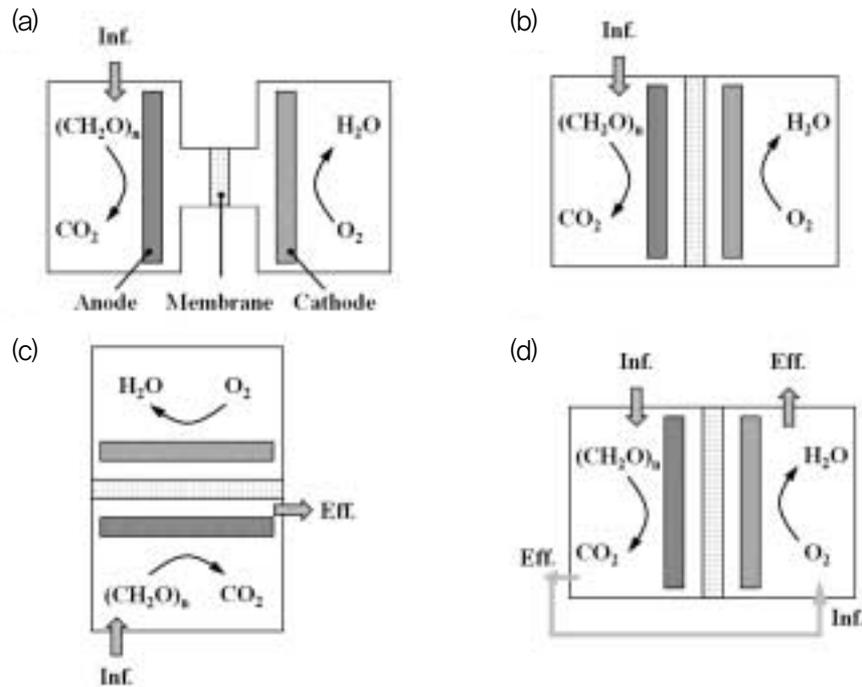


Fig. 2. Schematic of the two chamber microbial fuel cell: (a) H-type MFC, (b) Cube-type MFC, (c) Cylindrical MFC, (d) Single stream MFC.

pH 저하가 발생한다.^{50,59)} 반면 환원전극조에서는 음 저항 등으로 인하여 산화전극조로부터 공급된 수소이온의 양이 환원전극 상에서 산소환원에 소모된 수소이온의 양보다 작기 때문에 환원전극조의 pH가 증가한다. 비록 인위적으로 완충용액을 이용하여 pH를 중성으로 안정화시킬 수 있지만, 규모를 확대하여 실제로 적용할 경우 연속적인 완충액의 주입은 추가적인 비용을 야기한다. 따라서 수소이온의 이동이 효과적으로 일어날 수 있는 미생물연료전지의 설계 및 구조 개발에 보다 노력하여야 할 것이다.

4. 실용적 적용을 위한 미생물연료전지 설계 및 구조 최적화

4.1. 양 전극조 미생물연료전지(Two Chamber MFC)

초기의 미생물연료전지 구조는 산화전극조(anode chamber)와 환원전극조(cathode chamber)를 위한 두 개의 병과 전해질이 포함된 염다리(salt bridge)로 구성되었으며, 미생물에 의한 전기발생을 관찰하기 위한 기초연구에 사용되었다.^{60~62)} 염다리는 두 전극조의 전해질을 분리하는 한편 이온을 이동시켜 전해질 사이에서 전류가 흐르도록 하는데, 이후의 미생물연료전지에서는 염다리의 역할을 이온교환막(ion exchange membrane)이 대신한다. 전형적인 양 전극조 미

생물연료전지(two chamber MFC)는 원통형 관(tube)이 달린 두 개의 병과 두 관 사이에 삽입된 수소이온교환막(proton exchange membrane)으로 구성되며, 그 형상이 마치 영어 알파벳 'H'와 유사하여 'H-type MFC'로도 불린다(Fig. 2a).^{4,60,63,64)}

하지만 H-type MFC는 전극과 전극 사이의 거리가 멀고 전극에 비해 막의 크기가 상대적으로 작기 때문에 수소이온의 이동이 제한되어 결과적으로 높은 내부저항을 야기한다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 미생물연료전지는 막이 충분히 커질 수 있도록 전극조의 형태가 육면체로 바뀌고 두 전극조 사이에 직접 막을 삽입하는 구조로 발전한다(Fig. 2b).^{65,66)} 일반적으로 전극은 탄소 종이(carbon paper), 탄소 천(carbon cloth), 흑연 펠트(graphite felt) 등이 쓰이며, 일부 연구자들은 전극 표면적을 극대화하기 위하여 전극조 내에 흑연 알갱이를 충전하여 전극으로 활용하기도 한다.^{55,67~69)} Min과 Logan⁷⁰⁾은 두 전극조 사이에 막·전극 어셈블리(MEA, membrane electrode assembly)를 삽입하고 전극조에 구불구불한 유로(channel)를 두어, 흡사 화학연료전지와 유사한 구조의 평판 미생물연료전지(flat plate MFC)를 고안하였다. 막·전극 어셈블리는 전극과 막을 고온에서 압착(hot press)하여 결합한 것을 말한다. 이들은 환원전극으로 사용할 탄소천과 수소이온교환막을 결합하고 환원전극조에는 전해질 대신 공기를 공급하여 시스템의 효율을 개

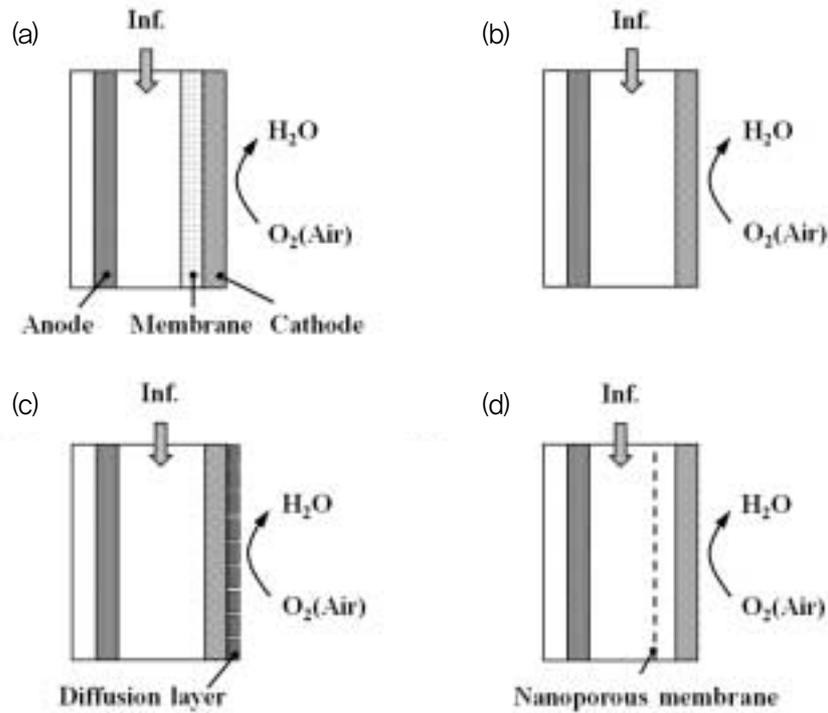


Fig. 3. Schematic of the single chamber microbial fuel cell: (a) Membrane-electrode assembly MFC, (b) Membrane-less MFC, (c) MFC with diffusion layer (d) MFC with nanoporous membrane. This figure is drawn with modification after Rinaldi.¹³⁾

선택하였다.

He 등^{71,72)}은 규모 확대(scale-up)가 쉽고 폐수처리에 적용하기 용이한 구조를 제안하기 위하여 원통형 상향류 미생물 연료전지(cylindrical upflow MFC)를 개발하였다(Fig. 2c). 그들은 두 개의 원통 사이에 막을 삽입하고, 위쪽 원통은 환원전극조로 아래쪽 원통은 산화전극조로 활용하였으며, 유입수는 산화전극조 아래쪽에 연속적으로 공급하였다.⁷¹⁾

최근에는 물질 전달(mass transfer)과 유체 순환(fluid circulation)을 최적화하기 위하여 단일 흐름(single stream)을 가지는 양 전극조 미생물연료전지가 제안되었다(Fig. 2d).^{23,68)} Freguia 등⁷³⁾은 산화전극조의 유출수를 환원전극조에 다시 유입시킴으로써, 산화전극조에서 미처 제거되지 못한 유기물을 환원전극조에서 호기성 산화에 의해 추가적으로 제거함으로써 안정적인 유출수질을 확보할 수 있다고 보고하였다. 게다가 산화전극조에서 발생한 수소이온의 일부는 막 대신에 환원전극조로의 연속적 유체흐름을 따라 이동할 수 있기 때문에 산소환원에 필요한 수소이온의 추가적 공급이라는 이점을 주기도 한다. 하지만 환원전극조 내에서 유기물의 호기성 산화는 오히려 환원전극의 전위를 감소시켜 결과적으로 셀 성능을 저하하는 부정적 영향도 있으므로, 이를 보완·개선하기 위한 연구가 필요하다.

4.2. 단일 전극조 미생물연료전지(Single Chamber MFC)

일반적으로 양 전극조 미생물연료전지는 환원전극조 내 전해질에 녹아 있는 용존산소를 전자수용체로 사용하며, 이를 위해서 송풍기를 이용하여 연속적으로 공기를 주입해야 한다. 하지만 공기주입 자체가 비용 소모적이며, 게다가 용존산소의 농도와 전달속도에 따라 환원반응이 크게 제한된다는 문제점이 있다. Park과 Zeikus⁷⁴⁾는 산화전극조의 한쪽 면에 미세다공층을 두고 여기에 환원전극을 결합하였으며, 별도의 환원전극조 없이 환원전극의 한쪽 면이 공기에 노출되는 단일 전극조 미생물연료전지(single chamber MFC)를 고안하였다. 이후 Liu와 Logan⁷⁵⁾은 원통형 조의 한쪽 면에 산화전극을, 반대쪽 면에 탄소천과 수소이온교환막을 결합한 막-전극 어셈블리를 둔 단일 전극조 미생물연료전지를 개발하였다(Fig. 3a). 환원전극과 막의 결합은 수소이온의 전달을 향상시켰으며, 이전의 양 전극조 미생물연료전지에 비해 상당히 높은 262 mW/m²의 최대 전력밀도를 달성하였다.

이들은 또한 고가의 수소이온교환막을 제거하고 오직 산화전극과 환원전극으로만 구성된 미생물연료전지를 운전하였을 때(Fig. 3b) 놀랍게도 최대 전력밀도가 494 mW/m²로 크게 증가함을 관찰하였으며, 소위 'Membrane-less MFC'의 가능성을 확인하였다. 하지만 수소이온교환막을 제거할 경우

쿨롬 효율이 40~50%였던 것이 9~12%로 크게 감소하였으며, 이는 상당한 양의 산소가 산화전극으로 확산됨에 따라 산화전극조 내 유기물의 일부가 호기성 산화에 의해 분해되었기 때문으로 나타난 전자손실로 설명된다.

막이 없을 경우 발생하는 또 하나의 문제점은 산화전극조 내 물이 환원전극을 통해 새어 나가서 증발한다는 사실이다. 이것을 해결하기 위해 Cheng 등⁷⁶⁾은 공기와 접촉되는 환원전극 면에 PTFE(polytetrafluoroethylene)를 코팅하여 일종의 확산층(diffusion layer)을 두었으며(Fig. 3c), 그 결과 전력밀도가 538에서 766 mW/m²으로 크게 향상되고 쿨롬 효율 또한 19에서 32%로 크게 개선됨을 입증하였다. 확산층은 환원전극을 통한 물의 방출을 줄여주며, 게다가 산소가 산화전극조로 확산되는 것 또한 막아주는 일석이조의 역할을 한다. 하지만 확산층이 지나치게 두꺼워지면 오히려 환원전극으로의 산소 전달이 방해될 수도 있다.

수소이온교환막이 없으면 환원전극은 자연스럽게 산화전극조 내 미생물에 노출되며, 환원전극 표면에 부착된 생물막은 수소이온의 전달을 방해하고 전극 표면에 코팅된 촉매의 기능을 약하게 할 수 있다. Biffinger 등⁷⁷⁾은 소형 미생물연료전지에 nanoporous polymer filter (nylon, cellulose, polycarbonate)를 산화전극조와 환원전극조 사이에 삽입하였다(Fig. 3d). 수소이온교환막을 사용하였을 때에는 최대 전력밀도가 11 W/m³인 반면에, 수소이온교환막 대신 polycarbonate를 사용한 경우는 오히려 최대 전력밀도가 16 W/m³으로 높게 나타났다. 그들은 이러한 증가가 nanoporous membrane의 공극을 통한 수소이온의 이동이 수소이온교환막의 전기삼투(electric osmosis)에 의한 수소이온 이동에 비해 더 효과적이기 때문이라고 설명하였다. 게다가 nanoporous membrane은 수소이온교환막에 비해 가격도 매우 저렴하고, 환원전극에 생물막이 형성되는 것을 막아주기 때문에 장기 운전에도 용이하다. 최근에는 microfiltration membrane을 사용한 사례도 보고되었으며,⁷⁸⁾ 이 연구에서도 수소이온교환막을 사용할 경우 오히려 내부저항이 증가하여 전력 밀도가 감소한다고 보고하였다.

4.3. 실용적 접근을 위한 미생물연료전지

4.3.1. 하·폐수처리공정 결합을 위한 침지형 미생물연료전지 (Submergible MFC)

폐수처리공정의 관점에서 볼 때 미생물연료전지는 일종의 생물막 공정(biofilm process)로 간주되며, 따라서 입자상 오염물질(particulate pollutant)을 제거하기가 어렵다. Logan²⁴⁾은 입자상 오염물질을 제거하기 위하여 'Solid

contact process'나 'MBR (membrane bioreactor)과 같은 별도의 후처리 공정(post-treatment process)을 미생물연료전지 후단에 연계하는 방안을 제안하였다. 하지만 새로운 후처리 공정의 추가는 상당한 초기비용 증가를 야기하며, 미생물연료전지의 유출수 내에는 유기물 농도가 작기 때문에 후처리 공정을 운전하는 것이 쉽지 않다. 최근에 일부 연구자들은 생물학적 폐수처리공정의 혐기조 혹은 호기조에 미생물연료전지를 직접 침지함으로써, 기존의 처리공정을 그대로 활용하면서 동시에 안정적인 유출수질을 확보할 수 있는 구조를 제안하였다. Min과 Angelidaki⁷⁹⁾는 단일 전극조 미생물연료전지를 혐기조에 침지함으로써, 산화전극조를 위한 별도의 공간이 필요 없고 공기 중의 산소를 전자수용체로 이용함으로써 204 mW/m²의 최대 전력밀도가 발생함을 확인하였다. 최근에는 Cha 등⁵⁶⁾이 활성슬러지공정의 호기조를 환원전극조로 사용하여 수중의 용존산소를 전자수용체로 공유하는 단일 전극조 미생물연료전지를 개발하였다. 이들은 수소이온의 전달을 향상시키기 위해 전극 간 거리를 불과 3 mm로 극히 줄였으며, 백금과 같은 고가의 촉매를 전혀 사용하지 않으면서 16.7 W/m³의 높은 최대 전력밀도를 달성하였다. 하지만 호기조 내 슬러지의 낮은 전도도는 높은 음 저항을 야기하며, 환원전극 표면의 생물막 형성은 산소의 전달을 제한할 수 있으므로, 향후 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구가 필요하다.

4.3.2. 무인 동력원을 위한 초소형 미생물연료전지(Mini MFC)

손가락 크기의 초소형 미생물연료전지는 보안용, 국방용, 의료용 등의 배터리나 센서로 활용하기에 적합하다. 특히 빛이 공급되지 않는 곳이나, 배터리의 재충전 또는 교체가 제한적인 환경에 유용하게 이용될 수 있다.⁸⁰⁾ Ringeisen 등⁸¹⁾은 산화전극조와 환원전극조의 단면적과 부피가 각각 1.2 cm²인 초소형 미생물연료전지에 *Shewanella oneidensis* DSP10을 식중하여 무려 500 W/m³의 높은 전력밀도를 획득하였다. 초소형 미생물연료전지는 전극조 부피 대비 큰 표면적을 가지며 반응에 참여하는 물질(기질, 수소이온, 전자수용체)의 확산 거리가 매우 짧기 때문에 일반적인 미생물연료전지에 비해 월등히 높은 전력밀도를 얻을 수 있다.

초소형 미생물연료전지는 강, 호수나 바다의 수중 상황을 감시 또는 관측하는 장치의 무인 동력원으로도 활용될 수 있다. 게다가 태양광 연료전지처럼 수면 위에 떠있어야 하거나 밤에는 발전을 못할 염려가 없다. 그러나 초소형 미생물연료전지는 산화전극조가 혐기상태로 유지되어야 하기 때문에 해양 혹은 호소의 퇴적층에만 위치해야 하는 단점이 있다. Ringeisen 등

⁸²⁾은 초소형 미생물연료전지에 *S. oneidensis* DSP10을 식종하고 산화전극조를 호기 조건으로 유지하도록 유입기질을 연속적으로 폭기시킨 후 주입하였다. 그 결과 놀랍게도 혐기 상태로 유지한 미생물연료전지에 비해 전력이 불과 33% 감소하였으며, 여전히 330 W/m³의 높은 전력밀도가 발생하였다. *S. oneidensis* DSP10은 통성 혐기/호기성 세균(facultative anaerobe/aerobe)으로 산소가 있는 상태에서도 Cr(VI)을 Cr(III)로 환원시킬 수 있다고 알려져 있다.⁸³⁾ 비록 산화전극을 호기조건으로 유지하면 산소 소모에 따른 전자 손실이 다소 일어남은 분명한 사실이지만, 통성 혐기/호기성 세균을 활용함으로써 초소형 미생물연료전지가 수중의 퇴적층뿐만 아니라 산소가 존재하는 어느 위치에서도 적용이 가능함을 알려주었다.

4.3.3. 전력 증가를 위한 스택형 미생물연료전지(Stacked MFC)

미생물연료전지로부터 다량의 전력을 얻기 위해서는 단위 반응조의 규모를 확대하는 방법과 여러 개의 반응조를 직렬 또는 병렬로 연결하는 방법이 있다. 미생물연료전지는 반응조의 크기가 증가할수록 내부저항 또한 비례적으로 증가하기 때문에,²⁵⁾ 효과적으로 규모 확대를 하기 위해서는 적절한 크기의 단위 반응조를 여러 개 연결하는 것이 더 유리하다. Aelterman 등⁸⁴⁾은 6개의 양 전극조 미생물연료전지의 전기적 연결을 직렬로 할 때와 병렬로 할 때의 전기화학적 성능을 평가하였다. 두 연결 방식에서의 분극 및 전력 곡선에 의하면, 직렬과 병렬 모두 각각 308과 263 W/m³의 높은 최대 전력밀도를 기록하였으며, 직렬연결의 경우에는 개방전압(OCV, open circuit voltage)이 4.16 V이고 단락전류(short circuit current)는 최대 84.7 mA인 반면에 병렬연결의 경우에는 개방전압이 0.67 V이고 단락전류는 최대 425 mA로 나타났다. 비록 직렬연결에서 최대 전력밀도가 다소 높았지만 쿨롬 효율은 12.4%로, 병렬연결에서의 77.8%에 비해 매우 낮았다. 스택형 미생물연료전지는 최근 몇몇 연구자들에 의해 평가가 되었으나, 직렬연결 시 전위 역전(voltage reversal)의 문제가 발생하는 등^{84,85)} 여전히 명확한 방법론이 제시되지 않고 있어 더 많은 연구가 필요하다. Shin 등⁸⁶⁾이 고안한 스택형 미생물연료전지는 화학연료전지의 구조에서 착안한 것으로, 전극의 한쪽 면은 산화전극으로 다른 쪽 면은 환원전극으로 활용하는 bipolar plate를 적용하였으며, 스택형 설계의 좋은 사례로 손꼽힌다. 단위 미생물연료전지의 연결은 전기적인 직렬, 병렬 또는 직·병렬 혼합에 대한 고려(electric connection)도 중요하지만, 향후 연구에서는 유입 흐름의 분배와 관련한 수리적 연결방식(hydraulic

connection)도 함께 고려되어야 할 것이다.

5. 지속가능한 환경·에너지 융합기술로서의 미생물연료전지 전망

자원과 에너지의 고갈, 기후 변화 및 지구 온난화의 위기에 효과적으로 대응하기 위해서는 환경과 에너지 문제를 총체적으로 접근해야 한다. 서두에서 언급한 것처럼 지구가 허용 가능한 범위 내에서 인간의 활동을 확장하기 위해서는 자원순환과 같은 지속가능한 시스템으로의 체제 전환이 필요하다. 미생물연료전지는 인간이 사용하고 버린 오염물질로부터 유용한 에너지를 회수하기 때문에 단순한 재생에너지의 의미를 넘어선다. 특히 미생물연료전지의 생축매 전기 생산 기술이 하·폐수처리장과 연계될 경우, 과거의 소극적 환경처리 시설이 에너지 생산시설로, 또는 더 나아가 에너지 자립형 자원순환 시스템으로 발전하는데 크게 일조할 수 있다.

폐수 내 유기물은 열역학적으로 화학적 산소요구량(COD, chemical oxygen demand) 1 kg당 약 4 kWh에 상당하는 높은 에너지를 함유하고 있으며, 이러한 잠재 에너지를 회수한다면 기존의 폐수처리장에서 소모되는 전력의 상당 부분 혹은 그 이상을 충당할 수 있다. 게다가 혐기성 세균인 *exoelectrogen*은 호기성 세균에 비해 세포의 성장수율이 낮으며, 대사과정 중 발생하는 전자를 회수하기 때문에 전통적인 활성슬러지공정에 비해 슬러지 발생량을 현저히 줄일 수 있는 이점이 있다. 더욱이 대기 중 산소를 전자수용체로 활용하거나(air-cathode) 혹은 생축매를 이용함으로써(bio-cathode) 기존 처리장의 폭기 비용 또한 크게 절감할 수 있다.

비록 아직은 미생물연료전지에 의한 전력발생이 화학연료전지에 비해서는 낮은 수준이지만, 각국의 경쟁적 연구 개발은 불과 10여 년 사이에 괄목할만한 기술 성장을 거듭했다. 최근 일부 주요 연구그룹에서 파일럿 규모의 미생물연료전지를 시도한 사례가 보고되고 있으며, 지금의 추세를 살펴볼 때 향후 수 년 내에 미생물연료전지의 실용화가 달성될 것으로 전망된다. 이미 국내에서는 미생물연료전지를 이용한 BOD 센서 혹은 독성물질 감지 센서가 상용화된 사례가 있다. 또한 발전차액제도나 탄소배출권제도 등을 활용한다면, 미생물연료전지 기술이 자원순환형 하·폐수처리장의 청사진을 제시할 수 있다. 이 외에도 수중 무인 동력원이나 의료용 인체 배터리와 같은 다양한 분야로의 적용도 예상된다. 미생물연료전지는 복잡한 생물전기화학적 반응을 가지고 있기 때문에, 향후 다학제간 연구 개발 및 기술 융합이 미생물연료전지의

실용화 혹은 상용화의 길을 앞당길 수 있다. 바이오에너지 분야의 국가 경쟁력 제고를 위해서 정부와 기업의 적극적 투자와 관심이 절실히 요구된다.

KSEE

참고문헌

1. Global Footprint Network (<http://www.footprintnetwork.org>)
2. Pachauri, R. K., Reisinger, A. and Core Writing Team, "IPCC Fourth Assessment Report - Climate Change 2007: Synthesis Report," IPCC, Geneva, Switzerland.
3. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., "IPCC Fourth Assessment Report - Climate Change 2007: The Physical Science Basis," Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA(2007).
4. Logan B. E., Hamelers B., Rozendal R., Schroder U., Keller J., Freguia S., Alterman P., Verstraete W., and Rabaey K., "Microbial fuel cells: Methodology and technology," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), 5181~5192(2006).
5. Kim, B. H., Chang, I. S., and Gadd, G. M., "Challenges in microbial fuel cell development and operation," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **76**(3), 485~494(2007).
6. Rittmann, B. E., "Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology," *Trends biotechnology*, **24**(6), 261~266(2006).
7. Lovley, D. R., "Bug juice, harvesting electricity with microorganisms," *Nature reviews. Microbiology*, **4**(7), 494~508 (2006).
8. Potter, M. C., "electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds," Proceedings of the royal society of London. Series B, Containing papers of a biological character, **84**(571), 260~276(1911).
9. Allen, R. M., and Bennetto, H. P., "Microbial fuel cells: electricity production from carbohydrates," *Appl. Biochem. Biotech.*, (**39-40**), 27~40(1993).
10. Kim, B. H., Ikeda, T., Park, H. S., Kim, H. J., Hyun, M. S., Kano, K., Takagi, K., and Tatsumi, H., "Electro-chemical activity of an Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* IR-1, in the presence of alternative electron acceptors," *Biotechnol. Tech.*, **13**, 475~478(1999).
11. Logan, B. E., "Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells," *Nature reviews. Microbiology*, **7**(5), 375~381 (2009).
12. Bullen, R. A., Arnot, T. C., Lakeman, J. B, and Walsh, F. C., "Biofuel cells and their development," *Biosens. Bioelectron.*, **21**(11), 2015~2045(2006).
13. Rinaldi, A., Mecheri, B., Garavaglia, V., Licoccia, S., Nardo, P. D., and Traversa, E., "Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review," *Energy Environ. Sci.*, **1**(4) 417~429(2008).
14. Kim, B. H., Chang, I. S., Gil, G. C., Park, H. S., and Kim, H. J., "Novel BOD sensor using mediator-less microbial fuel cell," *Biotechnol. Lett.*, **25**, 541~545(2003).
15. Chang, I. S., Jang, J. K., Gil, G. C., Kim, M., Kim, H. J., Cho, B. W., and Kim, B. H., "Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor," *Biosens. Bioelectron.*, **19**, 607~613(2004).
16. Lorenzo, M. D., Curtis, T. P., Head, I. M., and Scott, K., "A single-chamber microbial fuel cell as a biosensor for wastewaters," *Water Res.*, **43**(13), 3145~3154(2009).
17. Lu, L., Ren, N., Xing, D., and Logan, B. E., "Hydrogen production with effluent from an ethaonol-H₂-coproducing fermentation reactor using a single-chamber microbial electrolysis cell," *Biosens. Bioelectron.*, **24**(10), 3055~3060 (2009).
18. Sleutels, T. H. J. A., Hamelers, H. V. M., Rozendal, R. A., and Buisman, C. J. N., "Ion transport resistance in microbial electrolysis cells with anion and cation exchange membranes," *Int. J. Hydrogen Energy.*, **34**(9), 3612~3620(2009).
19. Logan, B. E., Call, D., Cheng, S., Hamelers, H. V. M., Sleutels, T. H. J. A., Jeremiasse, A. W., and Rozendal, R. A., "Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter," *Environ. Sci. Technol.*, **42**(23), 8630~8640 (2008).
20. Scott, K., and Murano, C., "A study of a microbial fuel cell battery using manure sludge waste," *J. Chem. Technol. Biot., echnol* **82**(9), 809~817(2007).
21. Tender, L. M., Gray, S. A., Groveman, E., Lowy, D. A., Kauffman, P., Melhado, J., Tyce, R. C., Flynn, D., Petrecca, R., and Dobarro, J., "The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy," *J. power sources*, **179**(2), 571~575(2008).
22. Ieropoulos, I., Greenman, J., and Melhuish, C., "Microbial fuel

- cells based on carbon veil electrodes: stack configuration and scalability," *Int. J. Eng. Res.*, **32**(13), 1228~1240(2008).
23. Clauwaert, P., Mulenga, S., and Aelterman, P., "Litre-scale microbial fuel cells operated in a complete loop," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **83**(2), 241~247(2009).
24. Logan, B. E., *Microbial Fuel Cells*, John Wiley & Sons, Inc, New York, pp. 200(2008).
25. Clauwaert, P., Aelterman, P., Pham, T. H., Schampelaire, L. D., Carballa, M., Rabaey, K., and Verstraete, W., "Minimizing losses in bio-electrochemical systems: the road to applications," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **79**(6), 901~913(2008).
26. Min, B. K., and Logan, B. E., "Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrate in a flat plate microbial fuel cell," *Environ. Sci. Technol.*, **38**(21), 5809~5714 (2004).
27. Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., and Verstraete, W., "Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation," *Environ. Sci. Technol.*, **39**(20), 8077~8082(2005).
28. Lee, H. S., Parameswaran, P., Kato-Marcus, A., Torres, C. I., and Rittmann, B. E., "Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells(MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates," *Water Res.*, **42**(6-7), 1501~1510(2008).
29. Thygesen, A., Poulsen, F. W., Min, B. K., Angelidaki, I., and Thomsen, A. B., "The effect of different substrate and humic acid on power generation in microbial fuel cell operation," *Bioresource Technol.*, **100**(3), 1186~1191(2009).
30. Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y., and Kim, I. S., "Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells," *Bioresource Technol.*, **100**(14), 3518~3525(2009).
31. Kim, J. R., Jung, S. H., Regan, J. M., and Logan, B. E., "Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells," *Bioresource Technol.*, **98**(13), 2568~2577(2007).
32. Catal, T., Li, K., Bermek, H., and Liu, H., "Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells," *J. Power Sources*, **175**(1), 196~200(2008).
33. Catal, T., Xu, S., Li, K., Bermek, H., and Liu, H., "Electricity generation from polyalcohols in single-chamber microbial fuel cells," *Biosens. Bioelectron.*, **24**(4), 849~854(2008).
34. Wen, Q., Wu, Y., Cao, D., Zhao, L., and Sun, Q., "Electricity generation and modeling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater," *Bioresource Technol.*, **100**(18), 4171~4175(2009).
35. Nam, J. Y., Kim, H. W., Lim, K. H., and Shin, H. S., "Effects of organic loading rates on the continuous electricity generation from fermented wastewater using a single-chamber microbial fuel cell," *Bioresource Technol.*, in press(2009)
36. Greenman, J., Galvez, A., Giusti, L., and Ieropoulos, I., "Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: Comparison with a biological filter," *Enzyme Microb. Technol.*, **44**(2), 112~119(2009).
37. Clauwaert, P., Ha D., and Verstrate, W., "Energy recovery from energy rich vegetable products with microbial fuel cells," *Biotechnol. Lett.*, **30**(11), 1947~1951(2008).
38. Rodrigo, M. A., Canizares, P., Lobato, J., Paz, R., Saez, C., and Linares, J. J., "Production of electricity from the treatment of urban wastewater using a microbial fuel cell," *J. Power Sources*, **169**(1), 198~204(2007)
39. You, S. J., Zhao, Q. L., Jiang, J. Q., and Zhang, J. N., "Treatment of domestic wastewater with simultaneous electricity generation in microbial fuel cell under continuous operation," *Chem. Biochem. Eng. Q.*, **20**(4), 407~412(2006).
40. Mohan, S. V., Strikanth, S., and Sarma, P. N., "Non-catalyzed microbial fuel cell(MFC) with open air cathode for bioelectricity generation during acidogenic wastewater treatment," *Bioelectroche. Broenerg.* **75**(2), 130~135(2009).
41. Raghavulu, S. V., Mohan, S. V., Reddy, M. V., Mohanakrishna, G., and Sarma, P. N., "Behavior of single chambered mediatorless microbial fuel cell(MFC) at acidophilic, neutral and alkaline microenvironments during chemical wastewater treatment," *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**(17), 7547~7554(2009).
42. Lu, N., Zhou, S. G., Zhuang, L., Zhang, J. T., and Ni, H. R., "Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology," *Biochem. Eng. J.*, **43**(2), 246~251(2009).
43. Patil, S. A., Surakasi, V. P., Koul, S., Ijmulwar, S., Vivda, A., Shouche, Y. S., and Kapadnis, B. P., "Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber," *Bioresource Technol.*, **100**(21), 5132~5139(2009).
44. Huang, L., and Logan, B. E., "Electricity generation and treatment of paper recycling wastewater using a microbial fuel

- cell," *Environmental Biotechnol.*, **80**(2), 349~355(2008).
45. Kim, J. R., Dec, J., Bruns, M. A., and Logan, B. E., "Removal of odors from swine wastewater by using microbial fuel cells," *Appl. Environ. Microbiol.*, **74**(8), 2540~2543(2008)
 46. Feng, Y., Wang, X., Logan, B. E., and Lee, H., "Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells," *Environ. Biotechnol.*, **78**(5), 873~880(2008).
 47. 임봉수, 박혜숙, 김홍락, "매립장 침출수의 생물학적 난분해성물질 특성 규명." *한국물환경학회지*, **21**(5), 484~489(2005).
 48. Liu, H., Cheng, S., and Logan, B. E., "Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function on ionic strength, temperature, and reactor configuration," *Environ. Sci. Technol.*, **39**(14), 5488~5493(2005).
 49. Kim, I. S., Chae, K. J., Choi, M. J., and Verstraete, W., "Microbial fuel cells: Recent advances, bacterial communities and application beyond electricity generation," *Environ. Eng. Res.*, **13**(2), 51~65(2008).
 50. Rozendal, R. A., Hamelers, V. M., and Buisman, C. J., "Effect of membrane cation transfer on pH and microbial fuel cell performance," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), 5206~5211(2006).
 51. Torres, C. I., Marcus, A. K., and Rittmann, B. E., "Proton Transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria," *Biotechnol. Bioeng.*, **100**(5), 872~881(2008).
 52. Jadhav, G. S., and Ghangrekar, M. M., "Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration," *Biosource Technology*, **100**(2), 717~723(2009).
 53. Hong, S. W., Chang, I. S., Choi, Y. S., and Chung, T. H., "Experimental evaluation of influential factors for electricity harvesting from sediment using microbial fuel cell," *Biosource Technol.*, **100**(12), 3029~3035(2009).
 54. Min, B. K., Roman, O. B., and Angelidaki, I., "Important of temperature and anodic medium composition on microbial fuel cell(MFC) performance," *Biotechnol. Lett.*, **30**(7), 1213~1218 (2008).
 55. Chen, G. W., Choi, S. J., Lee, T. H., Lee, G. Y., Cha, J. H., and Kim, C. W., "Application of biocathode in microbial fuel cell: cell performance and microbial community," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **79**(3), 379~388(2008).
 56. Cha, J. H., Choi, S. J., Yu, H. N., Kim, H. S., Kim, C. W., "Directly applicable microbial fuel cells in aeration tank for wastewater treatment," *Bioelectrochemistry*, *In press*(2009).
 57. Aelterman, P., Versichele, M., Marzorati, M., Boon, N., and Verstrate, W., "Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes," *Biosource Technol.*, **99**(18), 8895~8902 (2008).
 58. Woodward, L., Tartakovsky, B., Perrier, M., and Srinivasan, B., "Maximizing power production in a stack of microbial fuel cells using multi-unit optimization method," *Biotechnology Progress*, **25**(3), 676~686(2009).
 59. Chae, K. J., Choi, M. J., Ajayi, F. F., Park, W. S., Chang, I. S. and Kim, I. S., "Mass transport through a proton exchange membrane(nafion) in microbial fuel cells," *Energy Fuels*, **22**, 169~176(2008).
 60. Min, B., Cheng, S., and Logan, B. E., "Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells," *Water Res.*, **39**(9), 1678~1686(2005).
 61. Liu, Z., and Li, H., "Effects of bio- and abio-factors on electricity production in a mediatorless microbial fuel cells," *Biochem. Eng. J.*, **36**(3), 209~214(2007).
 62. Mohan, Y. and Das, D., "Effect of ionic strength, cation exchanger and inoculum age on the performance of microbial fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**(17), 7542~7546(2009).
 63. Oh, S., Min, B., and Logan, B. E., "Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells," *Environ. Sci. Technol.*, **38**(18), 4900~4904(2004).
 64. Oh, E., and 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).
 65. Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S. D., Verhaege, N., and Verstrate, W., "Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer," *Appl. Environ. Microb.*, **70**(9), 5373~5382(2004).
 66. Kim, J. R., Cheng, S., Oh, S., and Logan, B. E., "Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells," *Environ. Sci. Technol.*, **41**(3), 1004~1009(2007).
 67. Viridis, B., Rabaey, K., Yuan, Z., and Keller, J., "Microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal," *Water Res.*, **42**(12), 3013~3024(2008).
 68. You, S., Zhao, Q., Zhang, J., Liu, H., Jiang, J., and Zhao, S.,

- "Increased sustainable electricity generation in up-flow air-cathode microbial fuel cells," *Biosens. Bioelectron.*, **23**(7), 1157~1160(2008).
69. Cha, J., Kim, C., Choi, S., Lee, G., Chen, G., and Lee, T., "Evaluation of microbial fuel cell coupled with aeration chamber and bio-cathode for organic matter and nitrogen removal from domestic wastewater," *Wat. Sci. Technol.*, In-press(2009).
70. Min, B., and Logan, B. E., "Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell," *Environ. Sci. Technol.*, **38**(21), 5809~5814 (2004).
71. He, Z., Minteer, S. D., and Angenent, L. T., "Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell," *Environ. Sci. Technol.*, **39**(14), 5262~5267(2005).
72. He, Z., Wagner, N., Minteer, S. D., and Angenent, L. T., "An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: Assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(17), 5212~5217(2006).
73. Freguia, S., Rabaey, K., Yuan, Z., and Keller, J., "Sequential anode-cathode configuration improves cathodic oxygen reduction and effluent quality of microbial fuel cells," *Water Res.*, **42**(6-7), 1387~1396(2008).
74. Park, D. H., and Zeikus, J. G., "Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation," *Biotechnol. Bioeng.*, **81**(3), 348~355(2003).
75. Liu, H., and Logan, B. E., "Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane," *Environ. Sci. Technol.*, **38**(14), 4040~4046(2004).
76. 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**(1), 364~369(2006).
77. Biffinger, J. C., Ray, R., Little, B., and Ringenisen, B. R., "Diversifying Biological fuel cell designs by use of nanoporous filters," *Environ. Sci. Technol.*, **41**(4), 1444~1449(2007).
78. Sun, J., Hu, Y., Bi, Z., and Cao, Y., "Improved performance of air-cathode single-chamber microbial fuel cell for wastewater treatment using microfiltration membranes and multiple sludge inoculation," *J. power sources*, **187**(2), 471~479(2009).
79. Min, B., and Angelidaki, I., "Innovative microbial fuel cell for electricity production from anaerobic reactors," *J. Power Sources*, **180**(1), 641~647(2008).
80. Biffinger, J. C., Byrd, J. N., Dudley B. L., and Ringeisen, B. R., "Oxygen exposure promotes fuel diversity for *Shewanella oneidensis* microbial fuel cells," *Biosens. Bioelectron.*, **23**(6), 820~826(2008).
81. Ringeisen, B. R., Henderson, E., Wu, P. K., Pietron, J., Ray, R., Little, B., Biffinger, J. C., and M/ Jones-Meehan, J., "High Power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(8), 2629~2634(2006).
82. Ringeisen, B. R., Ray, R., and Little, B., "A miniature microbial fuel cell operating with an aerobic anode chamber," *J. Power Sources*, **165**(2), 591~597(2007).
83. Lowe, K. L., Straube, W., Little, B., and Jones-Meehan, J., "Aerobic and Anaerobic Reduction of Cr(VI) by *Shewanella oneidensis* Effects of Cationic Metals, Sorbing Agents and Mixed Microbial Cultures," *Acta Biotechnol.*, **23**(2-3), 161~178 (2003).
84. Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H. T., Boon, N., and Verstraete, W., "Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(10), 3388~3394(2006).
85. Oh, S. E., and Logan, B. E., "Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation," *J. Power Sources*, **167**(1), 11~17(2007).
86. Shin, S., Choi, Y., Na, S., Jung, S., and Kim, S., "Development of bipolar plate stack type microbial fuel cells," *Bull. Korean Chem. Soc.*, **27**(2), 281~285(2006).