

Living Building Challenge의 하수처리시스템에 대한 미생물 연료전지의 응용

이채영 · Hong Liu* · 한선기**†

수원대학교 토목공학과, *오레곤주립대학교 생물 및 생태공학과

**한국방송통신대학교 환경보건학과

Application of Microbial Fuel Cells to Wastewater Treatment Systems Used in the Living Building Challenge

Chae-Young Lee, Hong Liu*, and Sun-Kee Han**†

Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon

**Dept. of Biological and Ecological Engineering, Oregon State University*

***Dept. of Environmental Health, Korea National Open University*

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to investigate the application of microbial fuel cells (MFCs) to the wastewater treatment systems employed in the Living Building Challenge.

Methods: I reviewed a range of information on decentralized wastewater treatment technologies such as composting toilets, constructed wetlands, recirculating biofilters, membrane bioreactors, and MFCs.

Results: The Living Building Challenge is a set of standards to make buildings more eco-friendly using renewable resources and self-treating water systems. Although there are various decentralized wastewater treatment technologies available, MFCs have been considered an attractive future option for a decentralized system as used in the Living Building Challenge. MFCs can directly convert substrate energy to electricity with high conversion efficiency at ambient and even at low temperatures. MFCs do not require energy input for aeration if using open-air cathodes. Moreover, MFCs have the potential for widespread application in locations lacking water and electrical infrastructure

Conclusions: This paper demonstrated the feasibility of MFCs as a novel decentralized wastewater treatment system employed in the Living Building Challenge.

Keywords: Decentralized wastewater treatment, electricity, living building challenge, microbial fuel cells (MFCs)

I. 서 론

물은 인류에게 필수불가결한 것이지만, 물 부족은 전세계적으로 매우 심각한 문제가 되고 있다. 이미 9억 명 이상의 인류가 안전한 음용수를 얻지 못하고

있으며, 현 상황은 수자원의 비효율적 이용과 수질 오염 및 기후변화로 인해 더욱 악화되고 있다.¹⁾ 따라서 공급한계에 이르고 있는 물 수요를 지속적으로 만족시키기 위한 기존 수자원에 대한 압력이 증가하고 있다.²⁾

†Corresponding author: Dept. 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: 27 August 2013, Revised: 27 September 2013, Accepted: 1 October 2013

기존의 집중하수처리시스템(centralized wastewater treatment system)은 도시의 규모가 작고 에너지 비용이 낮았을 때 잘 운영이 되었다. 그러나 도시화로 인해 증가하고 있는 하수처리의 집중화는 고비용과 저효율의 결과를 양산하고 있다. 수집은 하수의 처리와 처분에 있어서 가장 중요도가 낮지만, 집중하수처리시스템에서는 전체 비용의 약 60% 이상을 차지한다. 게다가 집중하수처리시스템은 많은 양의 에너지와 화학약품을 사용할 뿐만 아니라 많은 양의 슬러지, 악취 및 온실가스를 배출한다.³⁾

지속가능성은 하수처리의 가장 중요한 요소가 되고 있다. 그러한 면에서 덜 자원집약적이고 보다 환경적으로 지속가능한 분산하수처리시스템(decentralized wastewater treatment system)의 적용이 증가하고 있다.⁴⁾ 분산하수처리시스템은 수집을 가능한 최소화하고 하수의 처리 및 처분에 집중할 수 있어 더 효율적이다.⁵⁾

최근 몇 년 동안 건물에 분산하수처리시스템을 적용하는 그린 빌딩(green building) 운동이 전세계적으로 유행하면서 수자원을 바라보는 사람들의 관점을 변화시키고 있다. 물의 공급, 처리 및 재사용을 위한 분산하수처리시스템의 도입은 건물이 어떻게 계획되고, 설계되고, 건설되고, 운용되는지에 대한 개념의 변화를 가져오고 있다. 그러나 이러한 변화에도 불구하고 그린 빌딩 운동은 도시의 수자원 기반 시설을 크게 변화시킬 만큼 충분히 진행되지는 못하였다.⁶⁾

본 논문에서는 세계에서 가장 인증받기 어려운 친환경 건물 인증기준인 Living Building Challenge를 위한 분산하수처리시스템에 초점을 맞추어, 기존 분산하수처리시스템과 새로운 매력적인 대안으로서 미생물 연료전지(microbial fuel cells)를 살펴보고, 이를 바탕으로 향후 적절한 분산하수처리시스템의 대안을 제시하고자 한다.

II. Living Building Challenge

Living Building Challenge는 재생가능 재료를 이용하고 자체 수처리 시스템을 적용함으로써 건물을 더욱 친환경적으로 만드는 일련의 기준이다.⁷⁾ 이것은 2006년 Cascadia Green Building Council에 의해서 처음 만들어졌으며, 산하조직인 International

Table 1. Seven petals and twenty imperatives of Living Building Challenge⁸⁾

Petals	Imperatives
Site	Limits to growth
	Urban Agriculture
	Habitat exchange
	Car free living
Water	Net zero water
	Ecological water flow
Energy	Net zero energy
Health	Civilized environment
	Healthy air
	Biophilia
Materials	Red list
	Embodied carbon footprint
	Responsible industry
	Appropriate sourcing
	Conservation + reuse
Equity	Human scale + humane places
	Democracy + social justice
	Rights to nature
Beauty	Beauty + spirit
	Inspiration + education

Living Building Institute(ILBI)에 의해서 2009년 5월부터 운영이 되고 있다(참고로 ILBI는 2011년 초에 International Living Future Institute로 개명됨). 그 기준은 소유자와 설계자, 건축가, 엔지니어 등으로 하여금 환경적으로 건전하며 스스로 지속가능한 건물을 만들도록 요구하고 있다.^{8,9)}

Living Building Challenge에서의 요구사항은 크게 부지(site), 물(water), 에너지(energy), 보건(health), 재료(materials), 평등성(equity), 아름다움(beauty)의 7가지로 나눌 수가 있으며, 각각의 사항은 다시 총 20가지의 사항으로 세분화된다.^{8,9)} 이것들 중 가장 중요한 2가지는 건물이 현장에서 발생하는 하수를 모두 모아서 처리해야 한다는 것과 재생가능 재료를 이용해서 자체 에너지를 생산해야 한다는 것이다.⁷⁾ 그리고 이러한 기준으로부터 3단계의 인증이 수여되고 있다. 즉, 완전인증에 해당하는 'Living Status', 부분인증에 해당하는 'Petal Recognition', 그리고 최소인증에 해당하는 'Net Zero Energy Building Certification'이 수여되고 있다.⁹⁾ Table 1은 Living

Table 2. Building project certified by Living Building Challenge⁹⁾

Project	Location	Status	Owner / Developer	Project Details
Omega Center for Sustainable Living	Rhinebeck, New York, USA	Living	Omega Institute	Project Area: 141,350 ft ² Building Area: 6,246 ft ² Building Footprint: 6,246 ft ² Start of Construction: 11/2007 Start of Occupancy Period: 05/2009 Date Certified: 10/2010
Tyson Living Learning Center	Eureka, Missouri, USA	Living	Washington University	Project Area: 24,751 ft ² Building Area: 2,968 ft ² Building Footprint: 2,728 ft ² Start of Construction: 12/2008 Start of Occupancy Period: 05/2009 Date Certified: 10/2010
Eco-Sense Residence	Victoria, BC, Canada	Petal Recognition	Ann + Gord Baird	Project Area: 2,500 ft ² + outbuildings Building Area: 2,500 ft ² Building Footprint: 1,800 ft ² Start of Construction: 03/2007 Start of Occupancy Period: 12/2008 Date Certified: 10/2010
Hawaii Preparatory Academy Energy Lab	Kamuela, HI, USA	Living	Hawaii Preparatory Academy	Project Area: 95,832 ft ² Building Area: 5,902 ft ² Building Footprint: 11,535 ft ² Start of Construction: 09/2008 Start of Occupancy Period: 01/2010 Date Certified: 04/2011
Painters Hall	Salem, OR, USA	Petal Recognition	Pringle Creek Community	Project Area: 10,580 ft ² Building Area: 3,250 ft ² Building Footprint: 3,250 ft ² Start of Construction: 04/2009 Start of Occupancy Period: 04/2010 Date Certified: 04/2012
IDeAs Z ² Design Facility	San Jose, CA, USA	Net Zero Energy Building	Integrated Design Associates (IDeAs)	Project Area: 34,000 ft ² Building Area: 7,200 ft ² Building Footprint: 3,250 ft ² Start of Construction: 01/2007 Start of Occupancy Period: 10/2007 Date Certified: 04/2012

Building Challenge에서 요구하는 7가지의 상위기준과 20가지의 하위기준을 보여주고 있다.

Living Building Challenge에 참여하는 100개 이상의 프로젝트 팀이 있으며 이들 대부분은 공식적으로 International Living Future Institute에 등록되어 있다. 그들 중 3개의 건물이 2010년 10월에 인증을 받기 위한 세계 최초의 시도를 하였고, 미국 뉴욕(New York)주 라인벡(Rhinebeck)에 위치한 the Omega Center for Sustainable Living과 미주리(Missouri)주

유레카(Eureka)에 위치한 the Tyson Living Learning Center에게 완전인증에 해당하는 'Living Status'가 수여되었다. 그리고 캐나다 브리티시 컬럼비아(British Columbia)주 빅토리아(Victoria)에 위치한 the Eco-Sense residence에게는 부분인증에 해당하는 'Petal Recognition'이 수여되었다.⁸⁻¹⁰⁾

The Omega Center for Sustainable Living로부터의 모든 물은 the Eco Machine으로 흘러 들어가는 데, 주된 처리공정은 4개로 구성된 인공습지이다. 여

기에서는 화학약품 없이 미세조류, 균류, 세균, 식물, 달팽이 등을 이용하여 하수를 처리하며, 유출수는 대수층을 재충전하기 위해 그 지역에 분산배출 된다.¹¹⁾ 반면에 the Tyson Living Learning Center와 the Eco-Sense residence는 물이 사용되지 않는 생태 화장실을 이용한다. 이것은 건물의 물 수요를 대폭 감소시키고, 배설물을 외부로 배출함 없이 혐기성분해를 통해 비료를 생산한다. 목욕과 주방에서 배출되는 하수는 여과되어 관개용으로 재사용된다.^{12,13)}

그리고 추가인증으로서 2011년 4월에는 미국 하와이(Hawaii)주에 위치한 the Energy Lab at Hawaii Preparatory Academy에게 완전인증에 해당하는 'Living Status'가 수여되었다. 또한 2012년 4월에는 미국 오레곤(Oregon)주 세일럼(Salem)에 위치한 Painters Hall에게 부분인증에 해당하는 'Petal Recognition'이, 그리고 미국 캘리포니아(California)주 산호세(San Jose)에 위치한 IDEAs Z² Design Facility에게 최소인증에 해당하는 'Net Zero Energy Building Certification'이 수여되었다.⁹⁾ Table 2는 Living Building Challenge의 인증을 받은 건물을 보여주고 있다.

III. 기존 분산하수처리시스템

기존에 사용되고 있는 대표적인 분산하수처리시스템에는 생태 화장실(composting toilets), 인공습지(constructed wetlands), 재순환 바이오필터(recirculating biofilters), 생물막 반응기(membrane bioreactors) 등이 있으며, 특정 기술의 선택여부는 부지조건, 처리용량, 투자비용 등에 따라서 달라진다.⁶⁾

첫째, 생태 화장실은 물을 배출하지 않는 시스템이다. 이 시스템은 변기, 생분해조, 환기장치로 구성된다. 배설물은 혐기성미생물에 의해서 천천히 분해되어 원래부피의 약 10-30%로 감소되며 최종적으로 부식토가 된다.¹⁴⁾ 혐기성분해는 연속적인 단계를 거치게 되는데, 서로 다른 특정 미생물에 의해서 가수분해, 산생성, 초산생성, 메탄생성이 진행된다.¹⁵⁾ 생태화장실은 연속식 및 회분식 운전이 가능하다. 연속식의 경우, 새로운 배설물이 퇴비화 더미의 위로 공급되며 퇴비화 최종산물이 아래쪽으로부터 제거된다. 이 때 새로운 배설물로 인해 최종산물이 오염될 수 있다. 회분식의 경우, 연속식에서 발생할 수 있

는 오염의 확률을 크게 낮추며, 일정 주기 동안 모아진 퇴비화 더미는 수개월~수년 동안 혐기성 반응이 진행되도록 놓아둔다.¹⁶⁾ 생태 화장실은 일반적으로 중수도 시스템과 병행해서 사용되는데, 어떤 종류의 건물에도 사용이 가능하며 수세식 화장실을 사용하기에 제한된 수자원을 가진 지역에 특히 적절하다.⁶⁾

둘째, 인공습지는 물, 토양, 식물 및 미생물로 구성된 자연습지와 같은 방식으로 하수를 처리한다. 인공습지는 전처리조, 유입부, 불투수층 라이너(liner), 식생용 여재, 식물, 유출부로 구성되는데, 하수의 정화는 침전, 여과, 흡수, 흡착, 미생물 분해, 질소변환과 같은 다양한 물리학적, 화학적 및 생물학적 공정에 의해 이루어진다.¹⁷⁾ 인공습지는 표면흐름이나 또는 표면아래흐름을 이용해서 운전될 수 있다. 지표면 위에 수위가 있는 표면흐름 인공습지는 갈대, 부들과 같은 식물들을 이용하며 하수는 전처리조를 거친 다음 유입부를 통해 식물층을 채우게 된다. 표면아래흐름 인공습지는 하수가 흐르는 다공성 여재층이 충분히 깊어서 표면에서는 물의 흐름이 보이지 않는다.⁶⁾ 다양한 식물들은 하수처리시스템을 더욱 안정적이고 효율적으로 만든다. 인공습지는 다양한 크기로 만들 수 있으며 또한 다양한 기후에도 적용할 수 있다.¹⁶⁾

셋째, 재순환 바이오필터는 여재에 부착된 호기성 미생물에 의해서 하수를 처리하는 생물막 공정이다. 컨테이너, 분배장치, 여재, 펌프, 재순환 장치 등으로 구성된다. 컨테이너는 생물막이 잘 성장할 수 있는 다공성여재로 채워지며, 하수는 주기적으로 일정 양이 공급되어 여재를 투과한다.⁶⁾ 재순환 바이오필터는 단일공급시스템과 다중공급시스템으로 운전될 수 있다. 단일공급시스템에서는 하수가 바이오필터에 한번만 공급되어 처리되며, 다중공급시스템에서는 하수가 바이오필터에 반복적으로 공급되어 처리된다. 처리수와 유입수의 병합은 하수농도의 희석을 가져오며 그로인해 수리학적 부하율은 증가될 수 있다. 재순환 바이오필터는 독립적인 거주지는 물론이고 지역사회 수준까지 적용될 수 있다.¹⁶⁾

넷째, 생물막 반응기는 생물학적 처리와 막여과를 결합시킨 것으로, 수집, 전처리, 폭기, 막, 분배 장치로 구성된다. 막의 공극은 매우 작아서 미생물의 통과를 막기 때문에, 막을 이용해서 유출수로부터 미생물을 분리하여 폭기조로 반송할 수 있다.¹⁸⁾ 생물

막 반응기는 기존 활성슬러지 공정에 비해 유출수의 수질이 좋고, 적은 공간을 요구하며, 자동화가 쉽고, 고부하율과 긴 SRT에서 운전이 가능한 장점이 있는 반면에, 막의 비용이 높고, 에너지가 많이 소요되며, 막이 잘 막히는 단점도 있다.⁶⁾ 생물막 반응기는 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 그 중 하나는 막 모듈이 반응조 외부에 존재하는 것이다. 반응조 혼합액은 외부에 위치한 막에 의해서 물과 슬러지로 분리되며, 농축된 슬러지는 반응조로 반송된다. 또 한 가지는 막 모듈이 반응조 안에 잠겨있는 것이다. 흡입력이 작용하는 동안 슬러지는 막 표면에 쌓이고 물은 막을 통과하게 된다. 반응조의 밑부분에 있는 산기관을 통해서 압축공기가 확산되며 이로 인해 호기성 조건이 유지될 수 있다. 또한 기포는 막의 표면을 씻어내며 막의 외부를 세척한다. 생물막 반응기는 다른 공정들과 비교했을 때 상대적으로 작은 부지를 필요로 하기 때문에 건물이나 대학 캠퍼스 등에서 좋은 대안이 될 수 있다.¹⁹⁾

IV. 미생물 연료전지를 이용한 분산하수처리시스템

최근 미생물 연료전지는 하수를 처리하면서 전기를 회수할 수 있는 매력적인 대안으로 각광을 받고 있다.²⁰⁾ 미생물 연료전지는 전기화학적 활성을 지닌 혐기성 미생물의 촉매작용을 이용하여 유기물에 함유된 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 것이며, 관여하는 미생물들은 하수처리가 이루어지는 동안 더욱 성장하게 된다.²¹⁾ 일반적인 미생물 연료전지의 형태는 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 산화전극(anode)이 포함된 반응조, 환원전극(cathode)이 포함된 반응조, 분리막(membrane) 및 양쪽의 전극을 도전으로 연결한 외부 전기회로로 구성된다.²²⁾

하수는 미생물 연료전지의 기질로 쓰일 수 있는 다량의 유기물을 함유하고 있다. 하수처리과정에서 미생물 연료전지에 의해 생성되는 전기의 양은 기존 하수처리장에서 폭기에 사용되는 전기량의 반 정도를 감당할 수 있다. 또한 미생물 연료전지는 슬러지의 발생량도 약 50-90% 수준으로 감소시킬 수 있다.²³⁾ 더구나 유기물은 완전히 CO₂와 H₂O로 분해된다.²¹⁾

지난 10여 년 동안 미생물 연료전지의 성능은 거의 기하급수적으로 향상되었다.²⁴⁻²⁶⁾ 실험실 규모 미

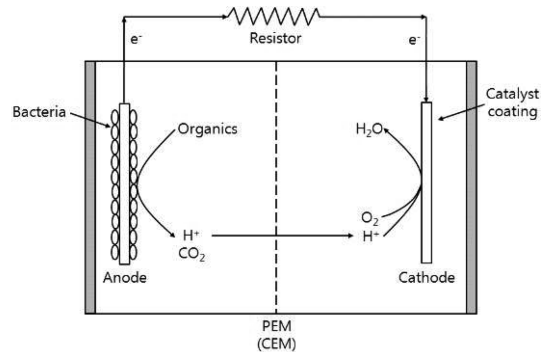


Fig. 1. Schematic diagram of microbial fuel cell (MFC)²²⁾

생물 연료전지의 전류밀도(약 10 A/m²)는 벌써 실용화 가능 수준까지 근접하였다.²⁷⁾ 하수처리에 적절한 미생물 연료전지의 두께를 최소 1 cm 정도로 가정하면, 실규모 미생물 연료전지는 약 1,000 A/m² 수준의 전류밀도를 나타낼 것으로 예상되고 있다. 이것은 약 7.1 kg COD/m³day의 하수처리능력을 의미하며, 활성슬러지 공정의 값(0.5~2 kg COD/m³day)보다 더 크다.^{20,25,28)} 최근에는 실험실 규모의 연구에서 초산을 처리하는 단일 CEA(cloth electrode assembly) 미생물 연료전지는 16.4 A/m²의 전류밀도를, 그리고 이중 CEA 미생물 연료전지는 7,600 A/m²의 매우 높은 전류밀도를 나타내어,²⁹⁾ 실용화의 새로운 장을 열었다.

그러나 미생물 연료전지를 하수처리의 대안으로 개발할 때, 에너지 효율보다 COD 제거율 및 유출수의 수질이 더욱 중요한 요소가 된다.^{30,31)} 미생물 연료전지는 글루코오스, 초산, 주정폐수, 가정하수, 식품가공폐수, 축산폐수와 같은 다양한 기질에 적용되고 있다.^{21,26)} 외기 산화전극을 이용하는 단일 미생물 연료전지는 12-20 h의 HRT에서 가정하수를 처리할 때, 약 70-80%의 COD 제거율과 약 12-40%의 쿨롱 효율(Coulombic efficiency)을 보였다.^{32,33)} 폭기장치를 갖는 이실 미생물 연료전지는 6 h의 HRT에서 약 99%의 COD 제거율과 약 80%의 쿨롱 효율을 보여주었다.³⁴⁾

그럼에도 불구하고 미생물 연료전지 실험은 기껏해야 mL~L 규모의 반응조에서 수행되어 왔다. 따라서 실제 하수처리장에서 운전이 이루어지려면 기존의 10⁻⁶~10⁻³ m³에서 적어도 1~10³ m³의 규모로 스케일 업이 필요한 상황이다.^{25,26)} 하수처리를 위한 스

Table 3. Comparison of various parameters between composting toilets, constructed wetlands, recirculating biofilters, membrane bioreactors (MBRs), and microbial fuel cells (MFCs)

Parameter	Composting toilets	Constructed wetlands	Recirculating biofilters	MBRs	MFCs ²⁰⁾
Direct conversion of substrate energy to electricity	None	None	None	None	High
Operational temperature	High	Ambient	Ambient	Ambient	Ambient and low
Energy input for aeration	None	None	High	High	None
Sludge production	None	Low	High	High	Low
COD removal	None	High	High	High	High
Nutrient removal (or nutrient recovery)	High	High	Low	High	Possible
Possibility of remote island application	High	Low	Low	Low	High
Economic feasibility	High	Average	Average	Average	High

케일 업의 관점에서 보면 외기-산화전극을 이용하는 단일 미생물 연료전지를 연속식으로 운전하는 것이 가장 유리하며,²¹⁾ 이렇게 함으로써 폭기비용과 막비용을 제외할 수 있다.

미생물 연료전지의 상업화에 있어서 가장 큰 걸림들은 높은 자본비용이다. 지금까지 보고된 최대 전력밀도(max. power density) 중 가장 높은 값을 보여준 이중 CEA 미생물 연료전지의 경우, 하수처리 시 COD 1 kg당 \$3이 소요되는 것으로 평가되었다. 단, 여기에서 탄소천/Pt/PTFE를 이용한 환원전극(cathode)은 m²당 \$1,500, 탄소천을 이용한 산화전극(anode)은 m²당 \$100, non-woven fabric layer를 이용한 분리기(separator)는 m²당 \$1, 반응조와 그 밖의 재료들은 m³당 \$5,000이 소요되며, 그리고 수명은 10년인 것으로 가정하였다.²⁹⁾

하지만 앞으로 대체재료에 대한 개발연구가 보다 많이 이루어져 재료비용이 더 내려간다고 가정하면, 즉 환원전극이 m²당 \$50, 산화전극이 m²당 \$10, 분리기가 m²당 \$0.2, 반응조와 그 밖의 재료들이 m³당 \$5,000이 소요되며, 수명이 10년인 것으로 가정하면, 실규모 미생물 연료전지 반응조를 이용한 하수처리 시 COD 1 kg당 \$0.1이 소요될 것으로 평가된다.²⁹⁾ 이 정도의 자본비용은 기존 활성슬러지 공정과 비교해도 별 차이가 없는 값이며,²⁵⁾ 또한 재료의 재활용, 효율적인 운전, 생산전기의 수익 등에 의해서 미생물 연료전지의 경쟁력은 더 커질 수 있다.

이와 같은 미생물 연료전지와 기존 분산하수처리 시스템들을 비교했을 때, 미생물 연료전지가 갖는 다

양한 장점들은 Table 3과 같다. 첫째, 기질에 함유된 에너지를 직접 전기로 전환시키는 유일한 공정으로서 효율이 매우 높다. 둘째, 상온이나 또는 저온에서도 효율적인 운전이 가능하다. 셋째, 외기-산화전극을 이용하는 경우에는 폭기에 소요되는 에너지의 투입이 전혀 없다. 넷째, 혐기성 공정이기 때문에 처리비용이 많이 소요되는 슬러지의 발생량이 적다. 다섯째, 다른 공정에 적합하지 않은 저농도 하수는 물론이며, 고농도 질소나 황을 함유한 하수 등에도 적용이 가능하여 영양물질을 제거할 수 있다. 여섯째, 수처리 시설과 전기생산 시설이 부족한 지역에서, 예를 들면 멀리 떨어진 크고 작은 섬들에서도 이용이 가능하다. 그러므로 기존 분산하수처리시스템들에 비해서 미생물 연료전지의 향후 응용가능성과 전망은 매우 크다고 할 수 있다.^{30,31)}

V. 결 론

미생물 연료전지는 기존 분산하수처리시스템에 비해 많은 장점들을 가지고 있다. 특히 미생물 연료전지는 하수처리와 동시에 전기를 생산할 수 있어 하수처리에 소요되는 에너지 비용을 크게 감소시킬 수 있다. 최근 에너지안보와 기후변화는 사용처에서 에너지를 생산하는 분산에너지생산시스템을 시급히 요청하고 있는데, 미생물 연료전지는 이러한 측면에서도 매력적인 대안이 될 수 있다. 환경보전에 대해 심화되는 압력과 재생가능 에너지에 대한 지속적인 요구는 미생물 연료전지의 개발에 더욱더 많은 투자

를 가져올 것이다. 그로인해 미생물 연료전지에 대한 이해가 향상되고 관련기술이 더욱 발전한다면 미생물 연료전지의 상용화는 멀지 않을 것이다. 따라서 미생물 연료전지는 Living Building Challenge에 적용될 수 있는 분산하수처리시스템의 매력적인 미래 대안이라고 할 수 있다.

참고문헌

1. Corcoran E, Nellemann C, Baker E, Bos R, Osborn D, Savelli H. (Eds). Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development, A Rapid Response Assessment. Kenya: United Nations Environment Programme Press; 2010. p.1-88.
2. Mankad A, Tapsuwan S. Review of socio-economic drivers of community acceptance and adoption of decentralised water systems. *J Environ Manage.* 2011; 92(3): 380-391.
3. Kirksey W. Creating a sustainable water infrastructure for the 21st century. Available: <http://www.worrellwater.com/resources> [accessed 19 September 2012].
4. Tchobanoglous G, Crites R. Wastewater Engineering (Treatment Disposal Reuse), 4th ed. New York: McGraw-Hill Press; 2003. p.151.
5. Massoud MA, Tarhini A, Nasr JA. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *J Environ Manage.* 2009; 90(1): 652-659.
6. International Living Future Institute. Toward net zero water: best management practices for decentralized sourcing and treatment. Available: <http://living-future.org/ilfi/ideas-action/research/water/toward-net-zero-water> [accessed 19 September 2012].
7. Langerman A. The living building challenge: raising the standards of renewable energy in homes. Available: <http://www.suite101.com/content/the-living-building-challenge-a47438> [accessed 20 September 2012].
8. Wikipedia. Living Building Challenge. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Living_Building_Challenge [accessed 27 October 2012].
9. Living Future Institute. Living Building Challenge Homepage. Available: <http://living-future.org/lbc> [accessed 27 October 2012].
10. DJC oregon. First projects meet Living Building Challenge. Available: <http://djcoregon.com/news/2010/10/12/3-projects-the-first-to-meet-living-building-challenge> [accessed 27 October 2012].
11. OMEGA. Omega Center for Sustainable Living. Available: <http://www.omega.org/omega-in-action/key-initiatives/omega-center-for-sustainable-living/eco-machine%E2%84%A2> [accessed 27 October 2012].
12. Biology Department at Washington Univ. in St. Louis. Living Learning Center at Tyson Research Center Homepage. Available: <http://tyson.wustl.edu/llc/index.php> [accessed 30 October 2012].
13. Eco-Sense. Eco-Sense Homepage. Available: <http://www.islandnet.com/~anngord> [accessed 30 October 2012].
14. USEPA. Water Efficiency Technology Fact Sheet: Composting Toilets. USA: Environmental Protection Agency Press; 1999.p.1-13.
15. Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues. Boston: McGraw-Hill Press; 1993.
16. California State Water Resources Control Board. Review of Technologies for the Onsite Treatment of Wastewater in California. USA: University of California Press; 2002.p.1-6.
17. Rousseau DPL, Vanrolleghem PA, Pauwa ND. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Water Res.* 2004; 38(6): 1484-1493.
18. Smith CW, Gregorio D, Taleott RM. The use of ultrafiltration membrane for activated sludge separation. USA: Purdue University Press; 1969. p. 1300-1310.
19. Ng ANL, Kim AS. A mini-review of modeling studies on membrane bioreactor (MBR) treatment for municipal wastewaters. *Desalination.* 2007; 212(1-3): 261-281.
20. Pant D, Singh A, Van Boraert G, Gallego YA, Diels L, Vanbroekhoven K. An introduction to the life cycle assessment (LCA) of bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy and product generation: Relevance and key aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2011; 15(2): 1305-1313.
21. 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 Advances.* 2007; 25(5): 464-482.
22. Han S-K. Microbial Fuel Cells: Principles and Applications to Environmental Health. *J Environ Health Sci.* 2012; 38(2): 83-94.
23. Holzman DC. Microbe power. *Environ Health Perspect.* 2005; 113(11): 754-757.
24. Logan BE, Regan JM. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in*

- Microbiol.* 2006; 14(12): 512-518.
25. Rozendal RA, Hamelers HVM, Rabaey K, Keller J, Buisman CJN. Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends in Biotechnol.* 2008; 26(8): 450-459.
 26. Lefebvre O, Uzabiaga A, Chang IS, Kim B-H, Ng HY. Microbial fuel cells for energy self-sufficient domestic wastewater treatment-a review and discussion from energetic consideration. *Applied Microbiol Biotechnol.* 2011; 89(2): 259-270.
 27. Torres CI, Marcus AK, Rittman BE. Kinetics of consumption of fermentation products by anode-respiring bacteria. *Applied Microbiol Biotechnol.* 2007; 77(3): 689-697.
 28. 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.
 29. Fan Y, Han S-K, Liu H. Improved performance of CEA microbial fuel cells with increased reactor size. *Energy Environ Sci.* 2012; 5(8): 8273-8280.
 30. Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS in Biotechnol.* 2005; 23(6): 291-298.
 31. Watanabe K. Recent developments in Microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy. *J Biosci Bioeng.* 2008; 106(6): 528-536.
 32. Liu H, Ramnarayanan R, Logan BE. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environ Sci & Technol.* 2004; 38(7): 2281-2285.
 33. Ahn Y, Logan BE. Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. *Bioresour Technol.* 2010; 101(2): 469-475.
 34. Freguia S, Rabaey K, Yuan ZG, Keller J. Sequential anode-cathode configuration improves cathodic oxygen reduction and effluent quality of microbial fuel cells. *Water Res.* 2008; 42(6-7): 1387-1396.