

# 새로운 그린에너지 리소스 - 미생물연료전지



장 재 경  
국립농업과학원 농업공학부  
에너지환경공학과  
jkjang1052@korea.kr

## 1. 서론

최근 환경오염, 자원고갈, 그리고 지구온난화에 의한 이상 기후현상 등 환경재해와 에너지 자원문제는 앞으로 국가의 존폐를 좌우할 만큼 중요한 문제로 대두되고 있다. 전 세계가 직면한 이러한 문제를 해결하기 위하여 선진국에서는 막대한 초기 투자비용에도 불구하고 화석에너지의 고갈에 대비한 적극적인 대책마련과 지구환경의 보전이라는 관점에서 신·재생에너지 개발에 과감한 투자하고 있다.

우리나라 또한 「저탄소 녹색성장(Low Carbon Green Growth)」을 국가 발전 비전으로 삼고 각 분야에서 활발하게 활동을 전개하고 있다. 신·재생에너지 분야는 투자비용이 크지만 현재까지는 에너지생성 효율이 낮은 상태이다. 그러나 화석연료의 고갈에 대비한 새로운 에너지원의 개발이라는 측면에서 지속적인 국가차원의 지원이 필요한 분야임에는 분명하다. 신재생에너지 분야는 태양광, 태양열, 바이오, 풍력, 수력, 폐기물, 지열, 연료전지, 석탄액화가스화, 수소에너지

등 11개의 분야로 구분되는데 각 분야별 연구개발 및 보급이 활발하게 되고 있다. 신재생에너지 분야는 IT, BT, NT 기술 집약된 분야로 가까운 미래 차세대 산업으로 경제 활성화에도 크게 기여할 것임은 의심할 여지가 없으며, 따라서 장기적인 목표를 가지고 운영되어야 한다.

신재생에너지원 개발과 더불어 최근 zero-waste society를 만들기 위해 노력하고 있는데 이는 과거 폐기물이 오염물질의 발생을 최소화하면서 처리할 수 있는 기술 개발에서, 이제는 자원 순환형 사회를 구축하는 것이다. 이를 위해서 효율적 생산, 폐기물 발생 최소화 그리고 발생된 폐기물은 재활용하거나 에너지로 환원시키는 방향으로 바꾸자는 것이다. 즉, 생산 단계부터 폐기물 발생을 컨트롤하여 환경적으로 안전하게 배출하고, 최소한으로 폐기물이 발생된다 하여도 폐기물을 에너지 리소스로 이용하자는 것이다. 이러한 패러다임의 변환의 key idea는 폐기물이 더 이상 폐기물이 아니라 자원리소스라는 것이다. 이러한 시대적 요구 및 상황에서 연료전지와 바이오에너지 분야에 속

하는 미생물연료전지는 자원순환형 사회에 적합한 환경융합신기술로써 주목받을 것으로 기대할 수 있는 새로운 신재생에너지 리소스라 할 수 있을 것이다.

본 글의 목적은 미생물연료전지 기술 개발의 필요성과 활용방안, 그리고 국내외 기술 개발 현황 및 향후 전망을 통해서 소개 하고자 하는 것이다.

## 2. 기술개발의 필요성 및 활용 방안

### 미생물연료전지 기원

미생물연료전지는 영국과학자에 의해 처음 소개되었고, 미국 항공우주국(NASA)은 이 기술을 우주선의 배설물을 재활용하는 연구에 이용하였지만 사용할 수 있는 미생물이 제한적이고 전자전달을 위하여 사용하였던 매개체(mediator)가 폐롭게 화합물질이 많아 환경에 영향을 미치는 것은 물론 미생물에도 영향을 미쳐 장기적으로 운전하는 것에 한계가 있어 미생물연료전지 연구가 지지부진해졌다(그림 1). 미생물연료전지는 미생물세포 안에서 환원되고 전극표면에서 산화될 수 있으며, 세포막을 쉽게 통과할 수 있는 물질-매개체 (mediator)-을 통해서만 미생물과 전극간의 전자전달이 가능하다고 알려져 있었다. 따라서 매개

체형 미생물연료전지에서는 methylviologen, thionine, 1,4-naphtoquinone등이 매개체(mediator)로 사용되었는데 매개체가 세포안에서 100% 회수가 안 되기 때문에 효율을 높이기 위하여 지속적으로 매개체(mediator)를 보충하여야 운전할 수 있었다. 또한 세포내에서 계속 축적되는 매개체는 일정농도 이상에서 대부분이 미생물에 독성으로 작용하여 결국 미생물의 대사가 중지되는 현상을 야기하였다. 또한 이들 매개체는 환경적으로 유해하다는 단점으로 매개체형 미생물연료전지는 lab-scale 연구를 벗어나지 못했다. 한계에 봉착했던 미생물연료전지의 연구가 1998년 산소 대신 철이온을 전달자로 사용하는 미생물 '슈와넬라'가 미생물 대사과정에서 생성되는 전자를 매개체 없이 직접 전극으로 전달할 수 있다는 것을 알아냄으로써 실용화 가능성을 보였다(Kim et al., 1999(a),(b)). 이러한 가능성으로 이후 미국 등 여러 나라에서 많은 연구비를 지원하여 실용 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

### 미생물연료전지의 메카니즘

미생물연료전지(microbial fuel cell)는 미생물이 전자공여체인 기질이 가지고 있는 화학에너지를 전기에너지로 전환하는 장치로 음극부와 양극부 그리고 양이온 교환막으로 구성되어 있는데 이것은 화학연료전지와 같다. 화학연료전지에서는 연료로 수소나 메탄올을 이용하고 이들의 산화반응 속도를 높이기 위하여 백금, 셀레늄, 루테튬 등 다양한 촉매를 사용하는데 미생물연료전지는 이러한 화학 촉매 대신 미생물을 촉매로 이용하는 것이다. 그리고 연료로는 미생물이 이용할 수 있는 유기물을 이용하게 된다.

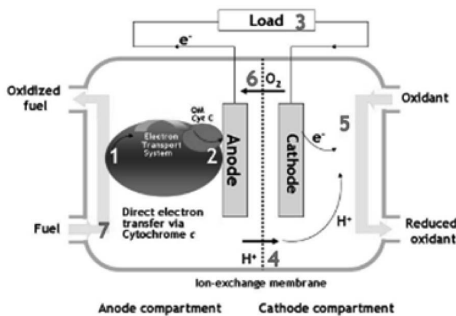


그림 1. 매개체형 미생물연료전지 구조도

혐기성 미생물들은 산소가 없는 조건에서 유기물을 소비하고 이 과정에서 발생하는 전자를 소비하기 위하여 산소 이외의 최종전자수용체를 사용하게 되는데 1998년 한국과학기술연구원 (KIST) 김병홍 박사팀은 금속염 환원세균인 *Shewanella putrefaciens* (슈와넬라)는 중성의 수용액에서는 거의 불용성인 Fe(III), Mn(IV)등을 전자수용체로 하여 성장하는 미생물인데 전자수용체의 용해도가 낮기 때문에 세포 내부에서 전자수용체를 환원할 수 없고 세포 안에서 유기물을 산화하고 발생하는 전자를 세포 밖으로 전달하여 전자수용체를 환원한다고 밝혀졌다(KIST 보고서 참조).

하지만 한국과학기술연구원(KIST) 연구팀에서는 '슈와넬라'가 세포 외부에 존재하는 전자수용체에 직접 전자를 전달할 수 있는 기작을 이용하면 균주가 전자를 mediator가 없이 직접 전자를 전달 할 수 있고 이를 무매개체형 미생물연료전지(mediator-less microbial fuel cell)로 개발할 수 있다고 발표하였다. 이들 연구팀에서는 싸이토크롬 C를 통한 전자전달체계의 가설을 세웠으며(그림 2) 이들의 실험을 뒷받침하기 위한 연구가 진행되고 있다.

이와 같은 배경에서 시작된 무매개체 미생물연료전지는 하·폐수 속의 유기물을 연료로 사용하면서 전류를 발생하는 미생물연료전지로 개발되고 있으며 실

용화의 가능성이 제기되기 시작하였다.

### 기술개발의 필요성

미생물연료전지는 위에서 언급한바와 같이 하·폐수 등에 포함된 유기오염물질을 미생물이 이용하여 전기를 발생시키는 장치로 개발되면서 하·폐수처리와 동시에 유용한 전기에너지를 생산할 수 있는 차세대 친환경 기술로 개발되고 있다. 미생물연료전지는 하·폐수처리에 많이 이용되는 활성슬러지법 - 폭기 등에 많은 에너지를 필요 - 과 비교하여 저에너지 소모 방식이며, 슬러지 발생이 이론적으로 약 1/3이하로 감소 될 것을 기대할 수 있기 때문에 경제적인 효과까지 기대할 수 있는 기술이다.

### 3. 국내외기술 개발 현황

현재 세계 미생물연료전지에 대한 기술 수준은 기초 연구 단계를 벗어나 목적에 따라 다양하게 이용 (폐수 처리장치, 에너지 발생장치, sensor 등)가능성에 대한 연구가 진행되고 있다. 하수처리 장치로써 기능을 이미 보였으며 유기오염물질 뿐 만 아니라 NTA, Sulfate, ammonium등 다양한 물질로부터 이들을 분해하면서 전기에너지가 발생하는 것이 확인되었다 (Chang et al. 2004), Jang et al.(2007); Logan et al.(2009), Lui et al. (2004), Catal et al.(2009); Zhao et al(2008)). 또한 생물학적산소요구량(BOD) 센서나 독극물 경고 장치로도 개발이 되었다. 그러나 아직은 해결해야 하는 과제들 많이 남아 있는 상태인데 극복해야 하는 일순이는 낮은 전기에너지 발생량을 향상시키는 것이다. 폐수처리를 위한 scale-up, 저가의

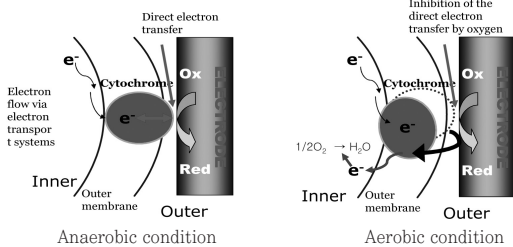


그림 2. 금속산화 세균(슈와넬라)의 멤브레인에 위치한 cytochrom과 전극 사이에서 제한한 전자 전달 방법.

재료 개발, 그리고 전기화학적 활성미생물의 기작이나 종류를 파악하여 대량생산할 수 있는 기술 개발 등으로 볼 수 있을 것 같다. 이와 같이 아직은 극복해야 하는 점들이 남아 있지만 미생물연료전지는 분명 지속가능한 친환경 에너지리소스로 다가오는 미래에 중요한 역할을 할 것이라고 생각된다.

### 국외 기술 개발 현황

매개체 없이 전자를 전극으로 전달할 수 있는 미생물이 존재한다는 연구결과가 발표되면서 미생물연료전지의 연구는 탄력을 받게 되었고, 이를 계기로 미국을 중심으로하여 유럽, 오세아니아, 아시아의 많은 연구팀들이 이 분야의 연구를 활발하게 하고 있다. 미국을 중심으로 미생물연료전지를 연구하는 과학자들은 전기화학적 활성을 갖는 미생물의 중요성을 인식하고 The Institute For Genome Research (TIGR)를 통하여 *Geobacter sulfureducens*의 전체 genome sequencing 작업을 완료하였으며 이 결과를 2003년 Science지에 발표하였다. 이들 미생물에서 전극으로 전자전달하는 메커니즘을 규명하고자 연구하고 있다. 미국 남가주대학의 Nealson 교수와 Craig Venter Institute의 Gorby박사는 미생물의 pili를 통해 전자가 미생물에서 전극으로 전달-nanowire-된다는 메커니즘을 규명하였다(그림 3). 펜실베니아 주립대학의 Logan 교수는 다양한 폐수로부터 전기에너지를 얻는 연구와 미생물연료전지 구조를 변화시킴으로써 전기에너지 생성 효율을 높이는 연구를 하고 있는데 이 팀에서는 브러쉬 타입의 전극을 사용함으로써 전기에너지 발생효율을 향상시켰다. 이 브러쉬 타입 전극은 폐수처리용 미생물연료전지의 전극 표면적을 넓혀 유

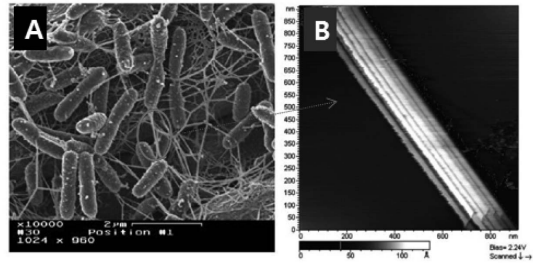


그림 3. 전극표면의 바이오필름(biofilm) 이미지 (참조: Gorby et al., (2006, 2010)).

용하게 이용될 것으로 기대된다.

또한 미해군성은 해저에 배치된 전기장비에 전원을 공급할 목적으로 해저 퇴적물에서 얻어 이들 군사장비에 에너지원으로 이용할 수 있는 연구를 하였다(그림 4).

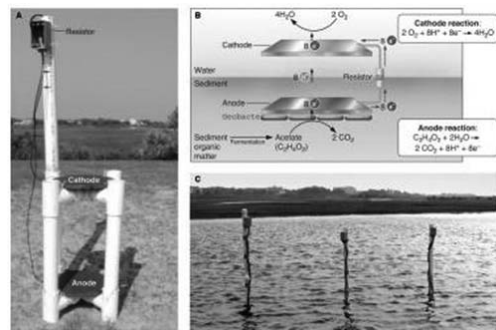


그림 4. 퇴적층연료전지(Sediment fuel cell), (A) 퇴적층에 배치하기 전 모습 (B) Sediment fuel cell 반응 모식도 (C) 퇴적층연료전지 배치 (참고: D. Lovley (2006)).

최근에는 미생물연료전지를 이용하여 전기에너지를 향상시키는 연구와 수소를 생성하는 생물전해전지 (microbial electrolysis cell)를 접목하는 연구도 하고 있다.

### 국내 기술 개발 현황

국내의 미생물연료전지 연구는 1999년부터 한국과

표.1 무매개체 미생물연료전지들의 power density의 비교 (Fan et al.(2007).

Cell type	Substrate	Anodes	Spacing/catholyte	$P_s$ ( $mW m^{-2}$ )	$P_v$ ( $W m^{-3}$ )
Double CEAs (continuously flow)	Acetate	Carbon cloth	0.4 cm <sup>a</sup>	1800	1010
Double CEAs	Acetate	Carbon cloth	0.4 cm <sup>a</sup>	1120	627
Single chamber (continuously flow)	Glucose	Carbon cloth	1 cm	1540	51
Single chamber	Glucose	Carbon cloth	1 cm	423	42
Single chamber	Acetate <sup>b</sup>	NH <sub>3</sub> -treated carbon cloth	2 cm <sup>c</sup>	1970	115
Single chamber	Glucose	Carbon cloth	2 cm	811	41
Single chamber	Acetate	Carbon paper	2 cm	1210	61
Single chamber	Acetate	Carbon cloth	4 cm	766	19
Single chamber	Acetate	Carbon paper	4 cm	506	13
Two chamber (miniature)	Lactate	Graphite felt	Ferricyanide	3000	500
Two-chamber	Glucose	Plain graphite	Ferricyanide	3600	216
Two-chamber (bipolar membrane)	Acetate	Graphite felt	Ferric iron	860	42
Two chamber (upflow)	Sucrose	Activated carbon	Ferricyanide	NA	29

<sup>a</sup> Spacing between the anodes of two CEAs, the anode and cathode spacing in each CEA is about 0.06 cm initially.

<sup>b</sup> 200 mM phosphate buffer.

<sup>c</sup> The spacing should be 1.7 cm based on  $P_s/P_v$ .

과학기술연구원의 김병홍 박사 연구팀에서 시작하였으며 직접 전자를 전극으로 전달할 수 있는 미생물이 있다는 것을 발표함으로써 폐수처리에 이용할 수 있는 초석을 마련하였다. 우리나라에서는 3~4년 전부터 미생물연료전지에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 2008년 한국해양대학교 송영채 교수팀은 하·폐수에 들어 있는 유기성 오염물질을 포함하고 있는 폐수 5L를 처리해 전기를 생산할 수 있는 규모로 1m<sup>3</sup> 당 220 watt의 전력을 생산할 수 있는 미생물연료전지를 개발하였다고 발표하였다. 이 결과는 실용화에 한걸음 바짝 다가섰다고 할 수 있겠다.

우리나라의 연구자에 의해 처음 무매개체 미생물연료전지를 운전함으로써 미생물연료전지분야의 발전할 수 있었을 만큼 우리나라의 기술력은 경쟁력을 가지고 있다. 그러나 외국의 경우 많은 연구비와 연자구자들이 조직적으로 그룹을 형성하여 연구하고 있는 상황이다.

#### 4. 미생물연료전지를 이용한 지속가능한 에너지 발생

미생물연료전지를 이용하여 전기에너지를 얻기 위해서는 농화배양 단계를 거쳐야 하는데 접종원과 폐수 종류에 따라 일반적으로 5일~20일정도가 소요된다. 농화배양 단계에서의 전류 패턴은 <그림 5>과 같이 전류발생 양상을 확인할 수 있다. 전류발생이 일정하게 나타나면 농화배양이 완료되었다고 판단할 수 있는 것이다. 농화배양이 완료되면 조건변화에 따른 영향을 확인하는 연구들 할 수 있는 것이다.

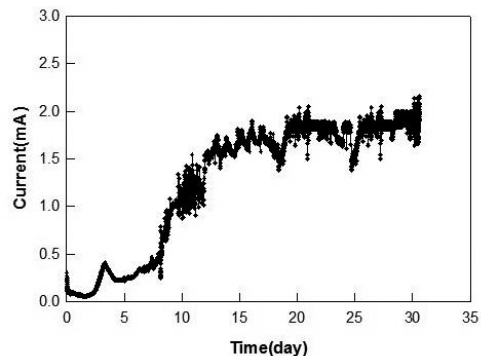


그림 5. 농화배양단계에서의 전류발생 (참고: Jang et al. 2004).

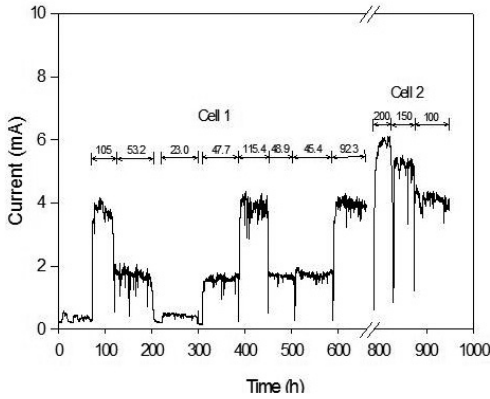


그림 6. 농도변화에 따른 전류발생 양상 (참고: Chnag et al. (2004)).

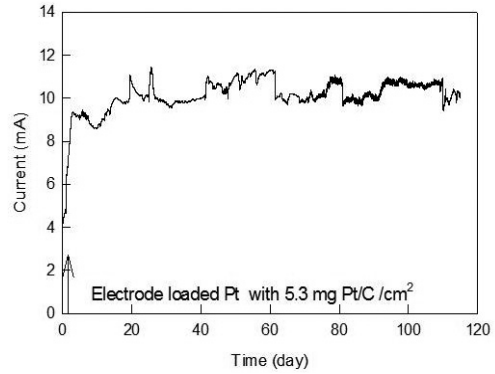


그림 8. 장시간 전류발생 양상 (참고: Jang et al. (2004))

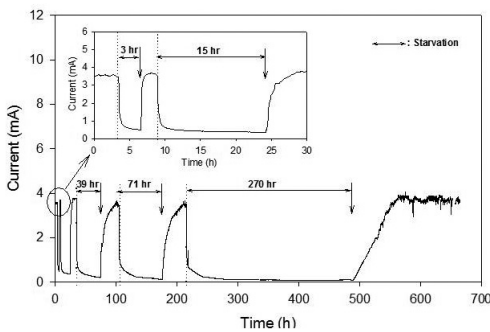


그림 7. 간헐적 폐수공급 (starvation)에 따른 전류 회복 (참고: Chnag et al. (2004)).

Chang et al(2004) 아래 <그림 6> 같이 유기농도와 전류 발생 양상을 보였는데, 유기물농도 (~200ppm)와 전류발생량이 비례관계에 있는 것을 확인할 수 있었다.

Starvation 운전 결과는 폐수처리 시스템인 경우 매우 중요한 요소가 될 수 있는데, <그림 7>은 폐수가 중단되었을 때 다시 전류가 회복되는 것을 확인한 결과이다. 폐수의 공급이 간헐적인 상황이 될 수도 있

며 때론 다른 원인에 의해 폐수를 공급할 수 없는 상황이 발생할 수 있는데 미생물연료전지는 270시간 폐수 공급이 중단 되도 원상회복되는 결과를 얻음으로써 운전 안정성을 보였다.

또한 Jang et al(2004)은 미생물연료전지에 폐수를 공급하는 약 4개월 동안 전류발생이 안정적으로 발생되는 것을 확인하였는데 이러한 연구결과들은 아직은 미생물연료전지가 극복해야 하는 셔틀넥이 존재하지만 충분히 하·폐수 처리와 동시에 전기에너지를 얻을 수 있는 시스템으로 이용가능성을 보여주는 것이다<그림8>.

## 5. 향후 전망

전기에너지를 발생하는 시스템으로써의 미생물연료전지는 에너지 발생량이 화학연료전지보다 훨씬 낮기 때문에 일각에서는 그 이용가능성에 대해서 부정적으로 보는 견해도 있다. 그러나 이 분야는 지난 5~6년 동안 급속히 발전하고 있으며 이들 결과는 미래 에너

지원으로써의 이용가능성을 밝게 하고 있다. 이와 더불어 다양한 분야에 활용 가능할 것이라는 것이다. 첫째, 70~90%정도 하수 처리효율이 되는 것으로 보고 되고 있어 하수처리 시스템으로 이용가능성을 보여주고 있다. 둘째, 유기오염물질 이외 다양한 환경오염원의 제거가 가능하다는 연구결과가 발표됨으로써 다양한 폐수처리 시스템으로도 이용할 수 있을 것이다. 이것은 2009년부터 국립농업과학원에서 가축분뇨를 대상으로 하는 연구에도 미생물연료전지를 이용하고 있으며 기존의 가축분뇨 처리시스템과 연계한다면 가축분뇨 처리는 물론 전기에너지가 발생하는 자가 발전시스템 될 수 있을 것이다. 셋째, 센서로도 개발이 가능하다는 것이다. 생물학적 산소요구량(BOD) 측정 계측기로는 연구 개발되어 시판되고 있으며, 독성물질 유입에 따른 경보장치로도 최근 개발 되어 시판되고 있다. 이외에도 South Florida 대학의 Wiklinson 교수는 Autonomous Robots(2000) 에 Gastrobot - literally 'robot with stomach' - 선보였는데 이것은 미래에 음식물쓰레기나 농산부산물을 먹고 움직이는 로봇이 개발될 수 있는 가능성을 소개하였다.

현재 미생물연료전지로부터 발생하는 전기에너지량은 적지만 미생물연료전지가 가지는 잠재능력은 미래 대체 에너지원으로써 뿐 만 아니라 환경적으로도 안정한 청정기술으로써 뿐 아니라 다양한 응용을 기대 할 수 있다. 따라서 장차 국가 에너지산업 및 산업경제에도 크게 영향을 미칠 것으로 기대된다.

## 6. 맺음말

미생물연료전지 연구가 본격적으로 시작된 것은 이제 불과 10년 남짓 되었으며, 현재 국내의 기술수준은

선진국과 크게 차이가 나지 않는다고 할 수 있다. 미생물연료전지 연구는 미생물학, 환경공학, 재료공학, 전기화학, 모델링, 분자생물학 등 다양한 분야의 연구자들이 연합하여 연구를 수행하면서 급속도 발전을 거듭하고 있는 상황이라 미생물연료전지가 극복해야하는 요소들이 머지않은 미래 해결될 것으로 생각된다. 따라서 국외 연구그룹과 비교하여 크게 기술적 차이가 나지 않는 이 분야의 연구 선전을 위해서 지속적인 노력이 필요하며, 핵심요소 기술의 개발을 위하여 조직적인 연구 그룹의 구성이 필요한 시점이라 하겠다.

## 참고문헌

1. Kim BH, Kim HJ, Hyun MS, Park DH. 1999(a). Direct electrode reaction of Fe (III) reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *J. Microbiol. Biotechnol.* 9:127-131.
2. Kim HJ, Hyun MS, Chang IS, Kim BH. 1999(b) A microbial fuel cell type lactate biosensor using a metal-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *J. Microbiol. Biotechnol.* 9, 365-367.
3. Chang IS, Jang JK, Gil GC, Kim M, Kim HJ, Kim BH. 2004. Continuous determination of biochemical oxygen demand using a microbial fuel cell type novel biosensor, *Biosens. Bioelectron.* 19, 607-613.
4. Jang, J.K.; Pham, T.H.; Chang, I.S.; Kang, K.H.; Moon, H.; Cho, K.S.; Kim, B.H. 2004

- Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Process biochemistry*, 39, 1007-1012.
5. Jang, J.K.; Chang, I.S.; Moon H.; Kang, K.H.; Kim, B.H. 2007 Nitritotriacetic acid degradation under microbial fuel cell environment. *Biotech. Bioeng.*, 95, 772-774.
  6. Liu H, Ramnarayanan R, Logan BE. 2004. Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*, 38(7), 2281-2285.
  7. Logan BE. 2009. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Rev. Microbiol.*, 7(5):375-381.
  8. Catal T, Bermek H, Liu H. 2009. Removal of selenite from wastewater using microbial fuel cells. *Biotechnology letters*, 31(8), 1211-1216.
  9. Zhao F, Rahunen N, Varcoe JR, Chandra A, Avignone-rossa C, Thumser AE, Slade RCT. 2008. Activated Carbon Cloth as Anode for Sulfate Removal in a Microbial Fuel Cell. *Environ. Sci. Technol.* 42, 4971-4976
  10. Cheng S. and Logan BE. 2007. Ammonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cells. *Elec. Comm*, 9, 492-496.
  11. Gorby YA, Yanina S, McLean JS, Rosso KM, Moyles D, Dohnalkova A, Beveridge TJ, Chang IS, Kim BH, Kim KS, Culley DE, Reed SB, Romine MF, Saffarini DA, Hill EA, Shi L, Elias DA, Kennedy DW, Pinchuk G, Watanabe K, Ishii H, Logan B, Neals KH, Fredrickson JK. 2006. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *PNAS*, 103, 11358-11363.
  12. Lovley DR. 2006. Microbial energizers: Fuel cells that keep on going. *Microbe* 1(7):323-329.
  13. Fan Y, Hu H, Liu H. 2007. Enhanced Coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. *Journal of Power Sources* 171, 348-354.
  14. Yuzvinsky TD and Neals KH. 2010. Bacterial nanowires and electricity generation in microbial fuel cell. The electrochemical society 217th ECS meeting.

기획: 홍성구 편집부위원장 bb9@hknu.ac.kr