

# 미생물 연료전지형 센서를 이용한 수질의 생물경보기술

>> 한국바이오시스템(주) 현문식 대표이사 ☎ 031-478-3422

E-mail : mshyun@korbi.com www.korbi.com

## 1. 기술개요 및 현황

최근 정부의 수질 오염 방지 및 처리에 대한 적극적인 대처에 따라 강, 하천 및 하폐수처리장등의 오염물질 감지에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 먹는물 관리 및 오염 처리하는 데에는 막대한 수처리비용이 요구되며, 안심하고 마실 수 있는 상수원 확보와 상수원 유입지역의 독성물질의 감시가 절실히 필요한 실정이다. 중금속류, 페놀류 화합물 및 농약 등의 독극물질의 오염과 유기물 부하는 토양, 지하수나 상수원으로 이용하는 하천수의 수질을 급격히 악화시킴으로써 안심하고 마실 수 있는 상수원 및 농공업용수의 확보에 심각한 문제를 초래하고 있고 이러한 폐수가 하수처리장에서 적절히 처리되지 않고 방류되었을 경우, 상수원의 오염으로 인한 막대한 처리비용이 요구되어 국가의 경제적인 측면에서도 큰 손실을 가져오게 된다. 따라서, 이들 독극물질에 대한 유입 및 유출과정에서의 효과적이고 실질적인 감시시스템 구축과 지속적인 monitoring을 통하여 보다 맑은 물의 지속적인 공급을 위한 정책

적 제도를 정착하는 것이 필요하다.

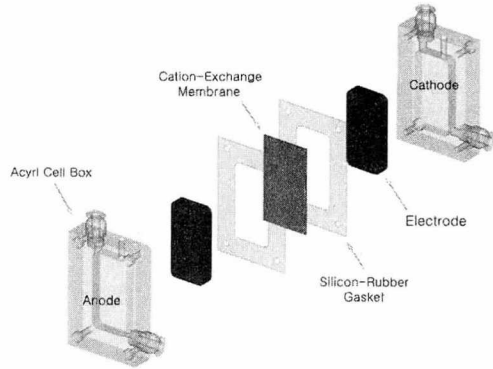
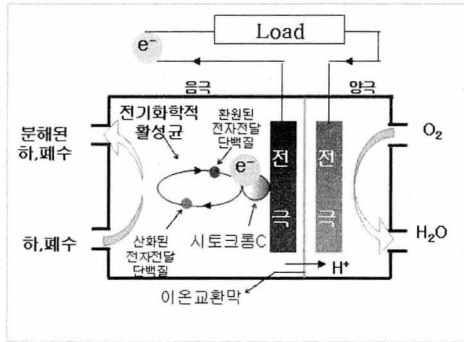
일반적으로 독극물질을 계측하기 위하여 AAS(Atomic Absorption Spectrophotometer), ICP/MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)등의 다양한 분석기기를 이용한다. 그러나, 산업폐수에서 배출되는 유해물질은 그 성상이 사용원료나 생산공정에 따라 다양하기 때문에 정량분석에 따른 많은시간과 비용이 필요하며, 실시간 경보기능을 수행하기에는 한계가 많다. 따라서 수질보호를 극대화하면서 수질 감시비용을 최소화하고 연속적인 독성탐지가 가능한 생물지표종이 활용되어 오고 있다. 생물지표종에 의한 biomonitoring 기법은 1960년대 후반에 송어 등의 물고기를 이용하였고, 1970년대에는 물벼룩(Daphnia), 1990년대에 들어서 유전자 재조합을 이용한 발광박테리아(Bioluminescent Bacteria)를 활용해오고 있다. 그러나 아직까지도 세계적으로는 안정적인 독성물질 감지를 위한 생물경보장치의 개발이 현실적으로 이루어지지 않은 실정이다.

## 2. 생물경보 구조와 원리

미생물연료전지(microbial fuel cell)는 미생물이 에너지 대사에서 발생하는 환원력을 전기에너지로 전환시키는 장치이다. 미생물 연료전지에서는 촉매로서 작용하는 미생물이 유기물을 산화시킬 때 발생하는 전자가 전극으로 전달되어 전기를 발생하게 된다. 미생물연료전지는 음극(anode)과 양극(cathode)부분으로 구성되고 그 사이에 양이온 교환막으로 분

리된다. 음극부로는 유기물을 포함하는 시료와 전기화학적 활성미생물을 공급하고 양극부로는 물을 공급한 후 일정한 저항을 설정하여 준다. 이때 전자와 함께 방출된 수소이온은 양이온 교환막을 통하여 양극부로 이동하여 산소와 반응하여 물이 생성된다. (그림 1)

전기화학적 활성미생물로 농화 배양된 미생물 연료전지에 유기물을 포함한 폐수를 주입하여 주면 전기화학적 활성미생물의 유기물 대사과정을 통하여 유기물을 분해하고 여기서 외부의 전자 수용체를 환원하게 된다. 이때 독극물이 포함된 폐수가 유입될 경우 독극물에 의해 미생물의 활성도가 떨어지므로 전자 흐름에 방해가 받게 되어 정상 전류보다 낮은 전류를 발생시키거나 경우에 따라서는 완전히 전자의 전달이 이루어지지 않아 전기적인 신호가 나타나지 않게 된다 (그림 2). 따라서 여기서 발생하는 전류의 변화양상을 모니터링 하여 독극물의 유입여부를 신속하게 판단할 수 있다.

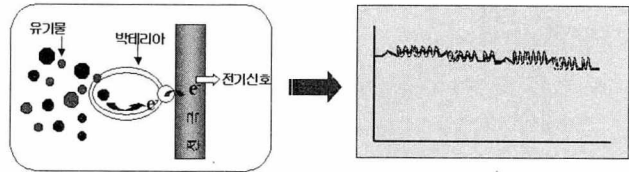


< 그림 1. 미생물연료전지형 생물경보센서 구조 >

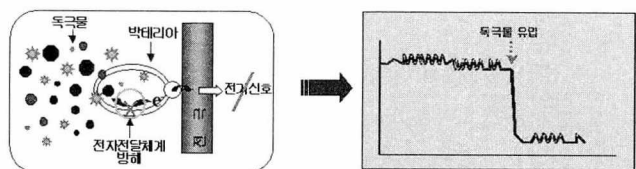
### 3. 생물경보장치의 구성

시료내의 독극물질의 유입은 아래의 공정도를 통해 감지된다 (그림 3). 전처리조를 통과하여 혐잡물이 제거된 측정시료는 독극물 감지센서의 음극부로 유입된다. 음극부의 유출수는 시료 채취조로 이동하여 사용자가 시료 분석을 위해 채취할 수 있으며, 독극물질이 함유되어 있지 않은 것으로 확인된 폐수는 시료 저장조에 저장되어 대체용 셀의 유지와 독극물 유입시 센서의 회복에 이용된다. 독극물 센서로부터의 신호는 전압측정기를 이용하여 측정되어 화면에 표시된다. 센서는 공정도에서와 같이 2개가 기본적인

(a) 일반적인 폐수 유입시

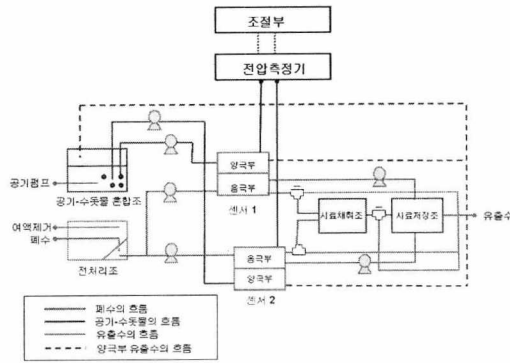


(b) 독극물 함유 폐수 유입시

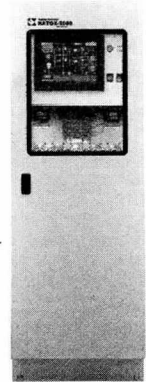


< 그림 2. 미생물 연료전지센서로부터의 발생하는 전기신호에 의한 생물경보 감지원리. >

로 장착되어 독극물의 유입으로 센서내부의 기능에 손상을 입었을 때에도 즉시 측정이 가능하다. 센서는 항온장치내부에 장착하여 온도를 35℃로 일정하게 유지시킨다. 제어부에는 각 장치에 제어 신호를 주며 이에 따른 동작상태를 파악하고 센서의 출력을 받아들여 독극물의 유입을 모니터링한다(그림 4). 분석부에는 생물정보센서와 독극물 유입에 대비한 대체용 셀이 함께 장착되어 운영된다. 생물정보센서는 열전소자를 이용하여 센서로 유입되는 유입시료의 온도를 미생물 배양에 가장 적절한 온도로 맞추어 센서의 온도를 일정하게 유지시켜 주는 항온장치내에 장착되어 신호가 안정적으로 출력된다. 시료전처리 및 시료저장부에는 시료채취조와 시료저장조가 장착되어, 시료내의 부유물질을 제거 등의 전처리와 독극물 유입시 시료의 채취(시료채취조), 대체용 센서의 운전 및 독극물 유입시 회복(시료저장조) 등에 이용된다.



< 그림 3. 생물경보장치 시스템 공정도 >



< 그림 4. 생물경보장치 사진 >

#### 4. 미생물 연료전지를 생물정보센서로 이용한 새로운 생물경보장치

현재까지의 개발된 생물경보장치로는 물고기의 유영양태, 속도변화에 따라 독성을 감지하는 장치, 물벼룩의 활성도 차이에 따른 독성을 감지하는 방법, 질산화 박테리아의 호흡활성도에 따른 산소 소모량 변화에 따라 독성을 감지하는 방법, 그리고 발광미생물의 발광변화정도에 따라 독성을 감지하는 방법 등이 있다.

(표 1). 미생물연료전지를 이용한 생물경보장치는 타 장비에 비해 센서의 안정성, 유지관리측면등 장점을 가지고 있다.

구분	물고기	물벼룩	발광미생물	미생물연료전지
측정원리	물고기의 유영양태, 속도 변화에 따른 독성감지	물벼룩의 활성도 차이에 의한 독성감지	형광미생물의 발광변화 정도에 의한 독성감지	전기화학적 활성미생물의 전기변화량에 의한 독성감지
측정시간	2분 테스트 10분 휴식	10분	45분 (사용자설정)	10분 이내 (사용자설정)
감지농도범위	수 ppb	수 ppm	수십 ppb	수 ppb
연속측정	반연속	반연속	자동화 시스템 조건하에서 실시간 측정가능	실시간 가능
센서의 안정성	노출 후 새로운 개체로 교체, 개체성장에 따른 센서는 차이		유전자 조작과 유지관리 필요	1년 이상 교체 없이 운영 가능
미생물 유전자조작	-	-	필요	필요 없음
유지관리비		개체 유지관리비용 높음	배양조건 및 well유지관리 비용 소요	기기 내부 튜빙 교체로 비용저렴
시약의 사용 및 부대시설	물벼룩, 물고기 유지관리용 약품 필요		well공급 및 well 채급을 위한 4℃ 저장조 필요	미생물의 배양과 분석에 따른 시약 불필요

< 표 1. 생물경보장치의 측정원리 및 특성비교 >

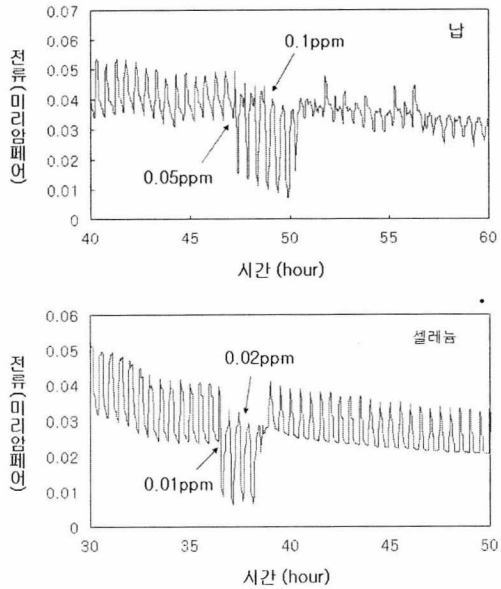
### 5. 유해물질 생물경보

미생물 연료전지를 이용한 생물경보장치는 독극물의 전기화학적 활성미생물의 전자전달체계 저해로 인한 전류신호의 변화에 의한 전류신호의 변화를 모니터링 함으로써 소량의 독극물의 유입에도 민감하게 반응하며 연속측정이 가능하며, 하천수질환경기준 수질 측정항목의 9가지 규제항목(카드뮴, 비소, 시안화합물, 납, 수은, 유기인, 6가 크롬, PCB, 계면활성제)에 대하여 반응성을 나타내었다. 중금속의 시험에서 납(Pb)을 주입한 경우 먹는물 수질 기준의 0.05ppm에서 전류값의 감소현상을 나타내었고, 셀레늄(Se)의 경우 역시 0.01ppm 주입시 급격한 전류값 감소를 보이는 것이 관찰되었다 (그림 5).

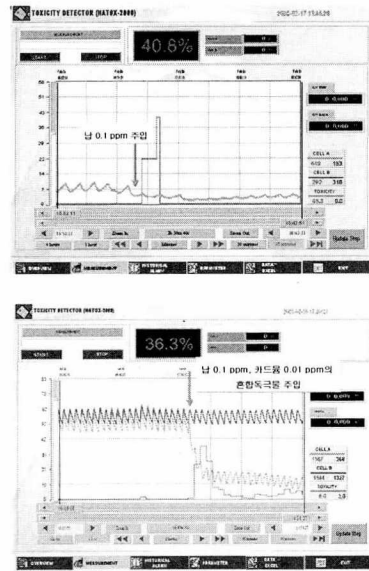
또한, 장비를 이용한 독성도 측정에서는 하천수질환경기준 수질 규제항목(카드뮴, 비소, 시안화합물, 수은, 유기인, 6가 크롬, PCB, 계면활성제)에 대하여도 반응성을 나타내었다. 그 예로서, 납 0.1ppm 주입시 40.8%의 독성도를 나타내었고, 납 0.1ppm 과 카드뮴0.01ppm 혼합 독성물질 주입시 36.3%로 유사한 독성도를 보였다. (그림 6)

### 6. 결론

미생물 연료전지를 이용한 생물경보장치는 순수 국내기술과 자본을 이용한 기술로서, 기존의 수입품에 의존하던 국내 시장에서 상당한 수입대체효과를 기대할 수 있다. 또한 기술의 우수성으로 독일, 일본 등 선진국에 대한 수출증대가 기대되며, 최소의 전력소모로 인한 에너지 절감효과, 생산성 향상, 원가절감, 기타 수질계측기와의 인프라구축을 통한 수질통



< 그림 5. 생물연료전지내 중금속(납, 셀레늄) 주입후 전류값 변화 >  
 납(0.05ppm, 0.1ppm), 셀레늄(0.02ppm, 0.01ppm)



< 그림 6. 미생물 연료전지를 이용한 생물경보장치의 독극물 유입시 주입 전후의 전류값과 독성도의 변화 >  
 납 0.1 ppm 주입 (위), 카드뮴(0.01 ppm)과 납(0.1 ppm) (아래)

합감시 시스템 구축도 가능하다.

이러한 생물경보장치는 상수원 보호를 위한 정부기관 산하의 많은 국내외 관리 시설 및 상수원보호구역, 그리고 공단 및 하수종말처리장의 유입구 유역에 주로 적용시켜 독극물 유입과 유기물 과부하에 대한 사전감지 및 차단수단으로 적용시킬 수 있다. 또한 독극물 방류 가능성이 높은 기업을 중심으로 설치함으로써 미연에 방지하는 제어시스템으로서 그 활용성이 높다. 뿐만 아니라 현재 다양한 환경규제항목들에 대한 측정기기 및 설비들과 연계하여 전반적인 시스템을 운영, 제어하는 총괄시스템으로의 구축이 가능하여 실시간 모니터링이 요구되는

처리장 및 시설에도 그 적용 가능성이 매우 높을 것으로 사료된다.

## 7. 기술검증

### 1) 인증

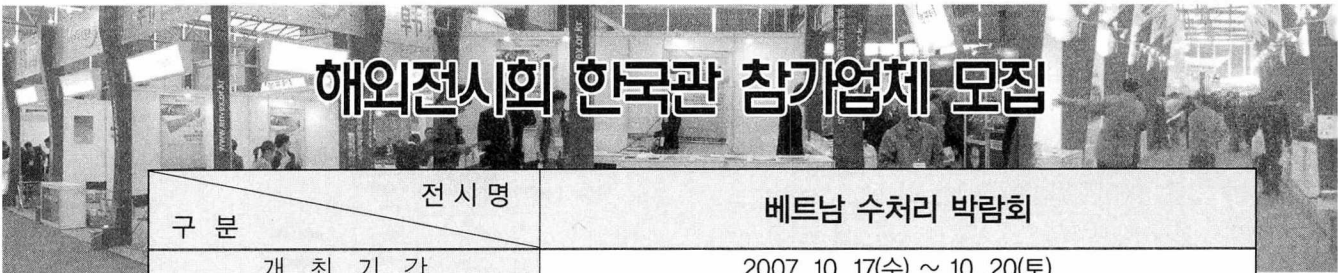
- 환경신기술 제 119호 "미생물연료전지형 센서를 이용한 수질변화 경보장치"
- 조달청 우수제품 인정서 제 2005110호 "미생물연료전지를 이용한 생물경보장치"

### 2) 특허

- 제 0483580호 미생물연료전지를 이용한 수질 내 독극물 감지장치 외 16

### 3) 포상

- IR52 장영실상 제 9092호
- 특허청 충무공상 제 2739호



구 분	전 시 명	베트남 수처리 박람회
개 최 기 간		2007. 10. 17(수) ~ 10. 20(토)
장 소		베트남 호치민
개 최 규 모		5,000m <sup>2</sup>
전 시 품 목		환경, 생태, 수처리, 정수
관람 예상인원		10,000여명
과년도 전시현황		전시업체수 : 120업체 / 전문바이어 : 5,000명
한국관참가규모		10업체 90sqm
행 사 주 관		환경보전협회
참가업체지원사항		참가비 등 일부 국고 보조
주 요 활 동 사 항		- 환경보전협회에서 한국관 설치·운영 - 우리나라 우수 중소기업, 환경설비·기술·제품 홍보 및 바이어 상담 - 양국간의 환경산업의 기술교류 확대 및 협조체제 구축방안을 위한 간담회 개최 및 환경기술 세미나 발표

※참가문의 : 환경보전협회 기획사업부 (☎ 02-2249-5265 교환 613, 617, 629)