

수질 내 유해물질 감지를 위한 생물경보 모니터링 시스템 구축에 관한 연구

정동희**† · 신인호* · 옥곤 · 이준흥**

부경대학교 대학원 지구환경공학과, *한국바이오시스템(주), **환경관리공단

A Study on Construction of a Biomonitoring System for Detection of Hazardous Water Pollutants (HWPs)

Dong-Hee Jung**†, In-Ho Shin*, Gon Ok and Jun-Heung Yi**

Graduate School of Earth Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

*KORBI Co., LTD

**Environmental Management Corporation

The microbial fuel cell is a useful device which converts biochemical energy to electrical energy through the catalytic reaction of microorganisms. Electrochemically active bacteria in a microbial fuel cell can generate electric current by oxidizing organic compounds. The generated electricity shows positive correlations with BOD concentration of the feed; metabolism of electrochemically active bacteria can be affected by variation of dissolved oxygen, ammonium ion, nitrate and organic compounds in water. In the presence of toxic materials, such as Cr^{6+} , As, Cd, metabolism of electrochemically active bacteria can be inhibited and consequently can decrease electricity generation from a microbial fuel cell. Comparing patterns of electricity generation by electrochemically active bacteria fed with water with different quality(DO, ammonia, BOD. etc) and toxicity, will allow this mechanism to be used in practical field.

Key words : Microbial fuel cell (MFC), Toxic material, Electrochemically active bacteria (EAB)

1. 서 론

지금까지 밝혀진 유해물질은 수십만 가지가 넘으며, 매년 수 백가지 이상의 새로운 인체에 유해한 물질들이 등록되어지고 있다. 기존의 물리, 화학적인 방법으로 수십만 가지의 물질을 모두 분석하는 것은 불가능하므로^{1,2,3} 상수원 및 수계 보호를 위해 유입되는 다양한 유해물질을 초기에 측정하여 경보하는 생물경보시스템이 유럽을 중심으로 구축되어 운영되고 있다.^{4,5} 우리나라도 2002년부터 국가수질자동측정망을 중심으로 물벼룩, 송사리를 이용한 생물모니터링 시스템을 도입하고 있다. 또한 국내에서 2011년부터 산업폐수생태독성 배출규제를 폐수종말처리장을 중심으로 시행하며, 생태독성 시험종으로 물벼룩 사용하여 생태독성 배출

을 관리할 예정에 있다.⁶

기존에 개발된 물고기, 물벼룩 생물경보시스템은 생물종의 유영정도를 카메라로 파악하여 유해물질을 감지하는 방식으로 고등생물을 사용하기 때문에 유지관리가 복잡하며, 유해물질에 대한 반응성이 느리다.^{7,8} 하등생물인 미생물을 이용하는 생물경보시스템에 사용되는 생물종은 *Vibrio fischeri*, *Nitrobacter* 등이 있다. *Vibrio fischeri*는 발광을 내는 해양 미생물로 미생물의 발광정도 따라 유해물질을 감지하는 방식으로 해양환경으로 배지 등의 성분을 유지시켜야하며, 저온 미생물이기 때문에 실온에서 측정을 하기 위해서는 유전자 조작을 해야 되는 단점이 있다.⁹ *Nitrobacter*를 이용하는 생물경보시스템은 *Nitrobacter*의 호흡량을 DO 측정기로 측정하여 DO 변화량에 따라 유해물질의 유입을 감지

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: greenair@emc.or.kr

하는 장치로써 DO 측정기의 유지 관리를 주기적으로 해야되는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 원핵생물인 전기화학적 활성미생물과 연료전지시스템을 이용하여 신속하게 미량의 유해물질을 감지할 수 있는 유해물질 감지장치를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 유해물질 감지장치는 활성슬러지 내에 존재하는 전기화학적 활성미생물을 이용하므로 농화배양 후 특별한 배양조건 없이 장기간 운영할 수 있으며, 발광 미생물과 같이 별도의 유전자 조작이나 미생물의 균일성 유지 등이 필요하지 않다.¹⁰⁻¹²⁾

따라서 전기화학적 활성미생물 셀형 유해물질 감지센서를 이용하여 수계유해물질에 대하여 그 감지능을 확인하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 유해물질 감지센서의 제작

본 연구에 사용된 유해물질 감지장치의 센서부인 미생물 연료전지의 구성은 Fig. 1과 같다. 미생물 연료전지는 크게 음극부, 양극부 그리고 양이온 교환막으로 구성된다. 음극부와 양극부의 센서 재질은 아크릴이며 센서의 양극부와 음극부의 부피는 각각 12 mL이다. 전극인 graphite felt(60*20*10 mm, electrolyt ca Inc. USA)는 carbon epoxy(electrosynthesis, USA)를 사용

하여 200°C에서 2시간 반응시켜 collector인 백금과 연결하였으며, 전극(graphite felt)은 센서를 제작하기 전 121°C에서 15분간 끓인 후 graphite felt내 공기를 제거하여 사용하였다.¹²⁻¹⁵⁾ 양이온 교환막(40*80 mm, nafion 424, dupont Co. USA)은 사용하기 전 증류수에 24시간 swelling한 후 음극부와 양극부 사이에 넣고 조립하였다.

2.2. 전기화학적 활성미생물의 농화배양

유해물질 감지센서에 전기화학적 활성균을 농화배양하기 위해서 경기도 광주하수처리장에서 취수한 활성슬러지를 사용하였다. 농화배양 전 음극부에 사용될 전극을 활성슬러지에 12시간 담가두어 전기화학적 활성균이 충분히 전극에 붙을 수 있도록 한 후 농화배양하였다. 농화 배양액은 15 mg/L KH_2PO_4 , 30 mg/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 50 mg/L $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 105 mg/L NaHCO_3 의 basal solution과 trace mineral solution(Nitrotriacetic acid 1.5 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.17 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L, $\text{ZnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.02 g/L, H_3BO_3 0.01 g/L, Na·molybdate 0.01 g/L, Na_2SeO_3 0.017 g/L, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.026 g/L, NaCl 1 g/L, $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L) 10 mL/L으로 구성되며 여기에 glucose 0.1 g/L와 glutamic acid 0.1 g/L를 넣고

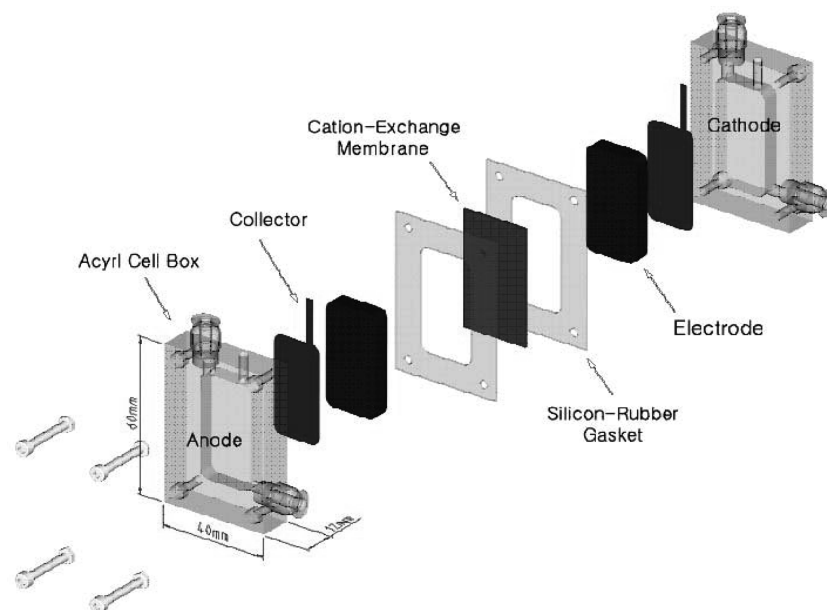


Fig. 1. The scheme of bacterial fuel cell.

pH 6.8~7.2로 조절하여 사용하였다.^{11,12)} 센서의 양극부는 공기로 과포화 된 증류수를 $6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 유속으로 주입하였으며, 음극부는 배양액을 $6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 유속으로 매 10분마다 3분 동안 주입하여 전기화학적 활성균을 농화배양하였다. 농화배양 초기에는 open circuit(저항 무한대)에서 운전하였으며 최대 전압에 도달 후 500Ω 을 걸어주어 독극물 센서를 안정화 시켰으며 급격한 저항 값의 변화에 따른 전류 변화 범위를 줄이기 위해 순차적으로 100Ω , 50Ω 으로 낮춰 안정화된 전압을 확인 후 유해물질 감지센서로 사용하였다.

2.3 유해물질 감지장치의 구성 및 운영 조건

미생물 연료전지를 이용한 유해물질 감지장치의 모식도는 Fig. 2와 같다. 센서의 양극부에 공기로 과포화 된 증류수를 $6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 유속으로 연속적으로 주입하였으며, 음극부에 시료와 배양액이 각각 $6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 유속으로 혼합되어 유해물질 감지센서내로 주입되며, 매 10분마다 3분 동안 주입하여 유해물질 감지장치를 운영하였다. 배양액의 성분은 2.2절에 제시한 농화배양액과 같다. 다채널 데이터 수집기(Keithly Co. USA)를 사용하여 유해물질 감지 센서의 전압을 측정하였으며, 전압 측정 시 전류 값에 50Ω 의 저항을 연결 후 환산하여 측정하였다. 실험은 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 실시하였으며 전류발생량을 측정하기 위하여 10분간의 coulomb yield(C, current(I) × time(t))를 계산하였다.

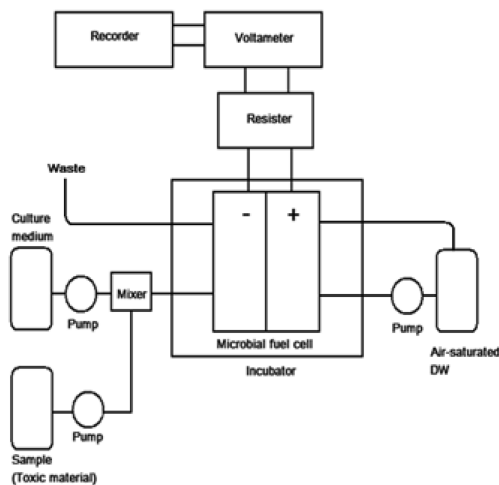


Fig. 2. The Scheme of a biomonitoring system.

2.4 용존산소, 암모늄 이온, 질산염 이온, 유기물의 농도에 따른 생물경보장치의 반응성

시료 내의 용존산소, 암모늄 이온, 질산염 이온, 유기물의 농도가 독극물 감지 센서에 어떠한 영향을 주는지 테스트하였다. DO 테스트는 배양액 및 시료를 vacuum pump(OMT-050A, ULVAC KIKO INC, Japan)로 15분 degassing하여 배양액 및 시료 내의 공기를 제거한 후 DO meter(D-70839, Innovative Sensors Inc, Germany)로 측정하여 사용하였으며, DO 6.8 mg/L와 DO 2.8 mg/L 시료를 테스트하였다. 암모늄 이온 테스트는 NH_4Cl 를 증류수에 첨가하여 암모늄 이온의 농도가 1 mg/L, 3 mg/L, 5 mg/L이 되게 하여 시료로 사용하였다. 질산염 이온 테스트는 KNO_3 를 증류수에 첨가하여 질산염 이온의 농도가 1 mg/L, 5 mg/L이 되게 하여 시료로 사용하였다. 유기물 농도별 테스트는 glucose 0.1 g/L와 glutamic acid 0.1 g/L를 증류수에 녹이고 pH를 7.0으로 조절한 후 BOD 농도가 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm이 되게 증류수에 희석하여 시료로 사용하였다.

2.5 유해물질 주입 실험

유해물질의 유입에 따른 유해물질 감지 센서의 반응을 알아보기 위하여 Cr^{6+} (SHOWA CHEMICAL, Japan), As(SHOWA CHEMICAL, Japan), Cd(SHOWA CHEMICAL, Japan)을 사용하였다. 각각의 유해물질의 농도는 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm이 되게 증류수에 첨가한 후 최종적으로 pH 6.8-7.2로 조절하여 시료로 사용하였다.¹¹⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 유해물질 감지 센서의 농화배양

경기도 광주 하수처리장에서 취수한 활성슬러지를 평균으로 하여 배양액을 공급하여 유해물질 감지센서 내 전기화학적 활성미생물을 농화 배양하였다. 농화 배양 5일 이후 다양한 농도의 유기물을 유입하였을 때 일정 시간이 지난 후 유해물질 감지센서의 안정된 전기신호를 확인할 수 있었으며, 이는 전기화학적 활성미생물이 안정적으로 농화 배양되었음을 나타낸다. 5일간 농화 배양된 유해물질 감지센서의 유기물 농도에 따른 전압의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 10분간의 coulomb yield가 유기물의 농도에 따라서 비례(상관계수 $r^2 = 0.97$)하는 것으로 나타났다.^{11,14-16)}

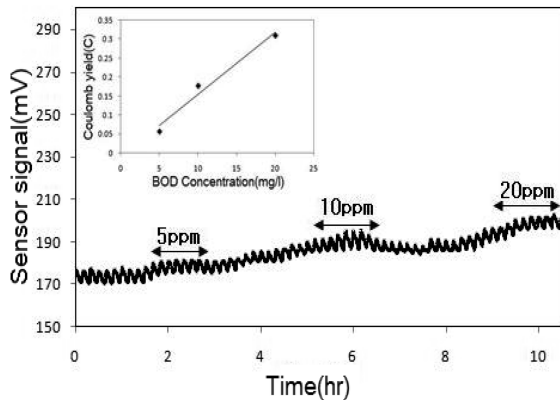


Fig. 3. Sensor signal variation with different BOD concentrations.

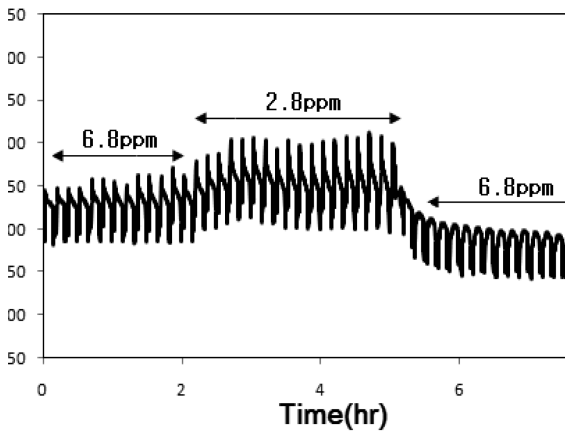


Fig. 4. Effects of DO on toxic sensor.

3.2. 용존산소 농도에 따른 유해물질 감지센서의 변화

용존산소 6.8 ppm과 2.8 ppm 시료를 유입시켜 테스트하였으며 측정된 전압을 Fig. 4에 나타내었다. 용존산소 농도가 6.8 ppm에서 2.8 ppm으로 감소하였을 때는 유해물질 감지센서의 전압은 40 mV 증가하였으며 이때 10분 동안 coulomb yield는 0.39C에서 0.42C로 7.7% 증가하였다. 용존산소 농도가 2.8 ppm에서 6.8 ppm으로 증가하였을 때는 유해물질 감지 센서의 전압이 100 mV 감소하였으며, 이때 10분 동안 coulomb yield는 0.42C에서 0.33C로 22% 감소하였다. DO가 증가할 때의 신호패턴은 유해물질 유입 시와 비슷하지만 유해물질이 유입 후 유해물질이 유입되지 않아도 센서신호가 회복되지 않는 반면 DO의 변화에 따라 센서신호는 회복되어진다. 일반적으로 전자 전달 매개체를 사용하지 않는 미생물 연료전지에서 전극을 전자 수용

체로 하여 전류를 발생할 수 있는 미생물은 *Shewanella* 와 같은 금속 환원 세균이다. 금속염 환원 세균은 세포 외막에 cytochrome c, flavin mononucleotide(FMN) 과 같은 전자 전달 매개체를 가지고 있기 때문에 세포 외부에 있는 금속염 들을 최종 전자 수용체로 하여 전자전달계에서 생성되는 전자를 소비한다.^{10,13,17-21} 하지만 시료 내에 질산염이나 산소와 같은 전자 수용체가 존재할 때에는 질산염 또는 산소와 같은 전자 수용체가 환원되며 금속염의 환원은 저해된다.^{22,23} 미생물 연료전지에서는 전극이 금속염을 대신하여 전자 수용체로 작용하여 전류가 발생하지만,²⁴ 시료 내에 용존 산소가 높을 때에는 전기화학적 활성 미생물의 전자전달계에서 생성된 전자가 전극을 통해서 이동되어지지 않고 산소에 의해 소비되어 물로 전환되어 소비되기 때문에 유해물질 감지센서의 전압이 감소한다. 반면 수중의 용존산소가 감소하였을 때에는 산소에 의해서 소비되는 전자가 줄어들고 전극으로 이동되어지는 전자가 많아지기 때문에 유해물질 감지 센서의 전압이 증가하는 것으로 사료된다.²¹

3.3. 암모늄 이온 농도에 따른 유해물질 감지센서의 변화

농화배양이 끝난 유해물질 감지센서에 암모늄 이온 농도에 따른 테스트를 하였으며 암모늄 이온의 농도에 따른 유해물질 감지 센서의 전압 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 암모늄 이온 1 ppm이 유해물질 감지 센서로 유입되었을 때 전압이 10 mV 정도 감소하는 경향을 보이지만 20-30분 내에 센서는 안정화되어진다. 이때 암모늄 이온 1 ppm이 유입되었을 때의 10분간의 coulomb yield는 0.375C으로 암모늄 이온이 유입되지 않았을 때의 10분간의 coulomb yield인 0.374C과 비

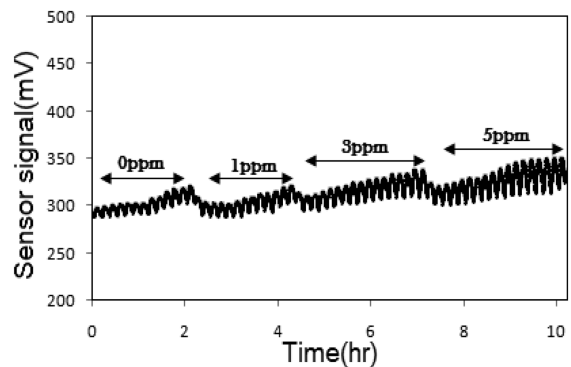


Fig. 5. Effects of ammonium ion on toxic sensor.

교하였을 때 큰 차이를 보이지 않았다. 암모늄 이온 3 ppm이 유입 시에는 암모늄 이온 1 ppm이 유입되었을 때와 마찬가지로 10 mV 정도 감소 후 20-30분 내로 센서가 안정화되어졌다. 암모늄 이온 3 ppm이 유입되었을 때의 10분간의 coulomb yield는 0.391C로 0 ppm이 유입되었을 때보다 4.5% 증가하였다. 암모늄 이온 5 ppm이 유해물질 감지 센서로 유입되었을 때 1 ppm, 3 ppm이 유입되었을 때와 마찬가지로 10 mV 감소 후 20-30분 내에 센서는 안정화되어진다. 5 ppm이 유입되었을 때의 10분간의 coulomb yield는 0.402C으로 0 ppm과 비교하였을 때 7.5% 증가하였다. 시료 교체 시 전압이 10 mV 떨어지는 것은 시료 유입 라인으로 공기가 들어가서 순간적으로 전압이 떨어진 것으로 보여진다. 암모늄 이온의 농도가 높아질수록 coulomb yield가 증가하는 것은 질화세균에 의해서 암모늄 이온이 산화되어지면서 전자와 수소이온이 생성되는데, 전자는 질화세균에 의해서 소모되어지고 수소이온은 양이온 교환막을 통해서 양극으로 이동되어져 양극의 이동되어지는 전자와 반응하여 전자의 이동 속도를 높여 주기 때문인 것으로 사료된다.²⁶⁾

3.4. 질산염 농도에 따른 유해물질 감지센서의 변화

암모늄 이온 테스트를 끝낸 후 2-3일 유해물질 감지 센서를 안정화 시킨 후 질산염 농도에 따른 테스트를 하였으며 질산염 이온의 농도에 따른 유해물질 감지센서의 전압 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 질산염 1 ppm이 유해물질 감지센서로 유입되었을 때 질산염 0 ppm일 때와 비교하여 센서의 전압이 80 mV 감소하였으며 10분간의 coulomb yield는 0.796C에서 0.719C으로 9.6% 감소하였다. 질산염 5 ppm이 센서로 유입되었을 때 질산염 0 ppm일 때와 비교하여 센서의 전압이 500 mV 감소하였으며 10분간의 coulomb yield는 0.796C

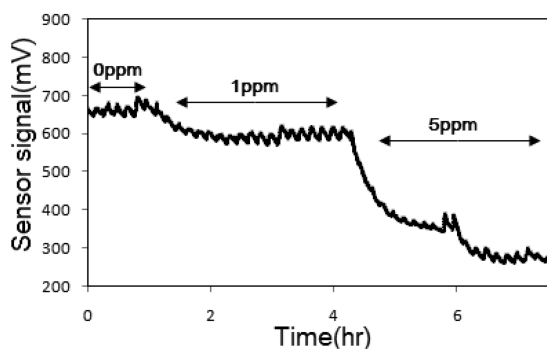


Fig. 6. Effects of nitrate on toxic sensor.

에서 0.116C으로 85%감소하였다. 질산염 농도가 증가함에 따라 유해물질 감지센서의 신호가 급격히 감소하는 것은 금속염 환원세균이 금속염을 환원시킬 때 질산염이나 아질산염이 존재하면 경쟁적으로 전자수용체로 작용하여 금속염 환원이 저해된다는 보고에서처럼^{18,19)} 미생물 연료전지를 이용한 유해물질 감지 센서 내의 금속염 환원세균도 전극을 전자 수용체로 작용하여 전자가 이동되어져 전류가 생성되지만,²⁴⁾ 질산염이나 아질산염 등이 경쟁적으로 전자수용체로 작용하기 때문인 것으로 사료된다.²⁵⁾

3.5. Cr⁶⁺의 농도에 따른 유해물질 감지센서의 변화

농화배양된 유해물질 감지센서에 Cr⁶⁺ 시료를 농도별로 연속 3회 유입시켰을 때 생성되는 전압을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. Cr⁶⁺이 유입되지 않았을 때의 10분간의 coulomb yield는 0.444C이며 Cr⁶⁺ 1 ppm과 5 ppm 시료 유입 시 센서의 전압이 20-30 mV 감소하였으며 이때 각각의 10분간 coulomb yield는 0.408C과 0.418C으로 Cr⁶⁺이 유입되지 않았을 때와 비교하여 각각 8%와 7%감소한 후 유해물질 감지 센서가 회복되었다. Cr⁶⁺ 10 ppm 유입 시에는 센서가 250 mV 이상 감소하였으며 이때의 10분간의 coulomb yield는 0.168C으로 Cr⁶⁺이 유입되지 않았을 때와 비교하여 62%가 감소되었으며 Cr⁶⁺이 들어있는 시료가 주입되지 않았을 때 유해물질 감지 센서의 전압이 회복되지 않았다. 이는 Cr⁶⁺은 산화제로서 전기화학적 활성미생물에서 생성되는 전자가 전극으로 이동하기 전에 Cr⁶⁺에 의해서 소비되어지거나 미생물의 단백질을 산화시켜 불활성화 시키기 때문에 전압이 떨어지는 것으로 보여진다.²⁷⁻²⁹⁾ Cr⁶⁺ 1 ppm과 5 ppm 농도에서는 미생물의 대사에 관련된 특정 단백질이나 손상되지 않

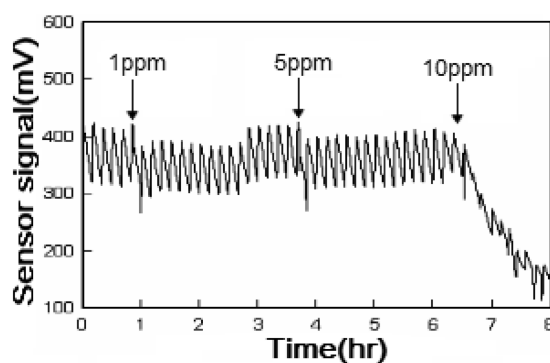


Fig. 7. Effects of Cr⁶⁺ on toxic sensor.

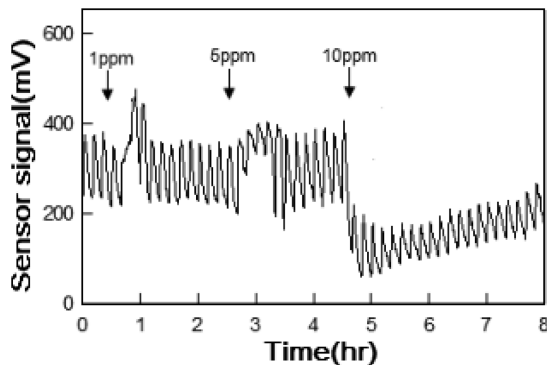


Fig. 8. Effects of As on toxic sensor.

거나 손상되어도 회복될 수 있지만 10 ppm 이상의 농도에서는 미생물의 대사에 관련된 단백질 등이 불활성화 되어서 전압이 회복되어지지 않는 것으로 관찰됐다.^{11,30)}

3.6 As의 농도에 따른 유해물질 감지 센서의 변화

농화배양된 유해물질 감지 센서에 As 시료를 농도별로 3회 유입시켰을 때 생성되는 전압을 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. As 1 ppm이 유해물질 감지 센서내로 유입되었을 때 전압은 90 mV 증가하였으며 이때 10분간의 coulomb yield는 0.468C로 As가 유입되지 않았을 때인 0.36C보다 30% 증가하였다. As 5 ppm을 유해물질 감지 센서 내로 유입 시 전압은 70 mV 증가하였으며 10분간의 coulomb yield는 0.432C이며 As가 유입되지 않았을 때보다 20% 증가하였다. As 10 ppm을 유해물질 감지 센서 내로 유입 시 전압은 200 mV 감소하며 10분간의 coulomb yield는 0.144C로 As가 유입되지 않았을 때인 0.36C보다 60% 감소하였다. As 1 ppm과 5 ppm이 유해물질 감지 센서에 3회 유입 후 As를 함유하지 않는 시료가 유입되었을 때 무부하 상태의 전압으로 바로 회복이 되었지만 10 ppm이 유입되었을 때에는 무부하 상태의 전압으로 회복이 되지 않았다. 이는 1 ppm과 5 ppm의 As 농도에서는 전기화학적 활성 미생물의 대사활성이 증진되거나 미생물의 전자 전달계에서 생성된 전자가 전극으로 쉽게 이동될 수 있도록 해주는 것으로 보인다.^{12,28)} 10 ppm의 As 농도에서 유해물질 감지 센서의 급격한 전압 감소는 비소의 농도가 높아짐에 따라 미생물 내에 있는 효소들의 thiol(-SH)기가 산화되어 효소가 불활성화 되거나 미생물 대사가 저해된 것으로 보인다.^{11,27-30)}

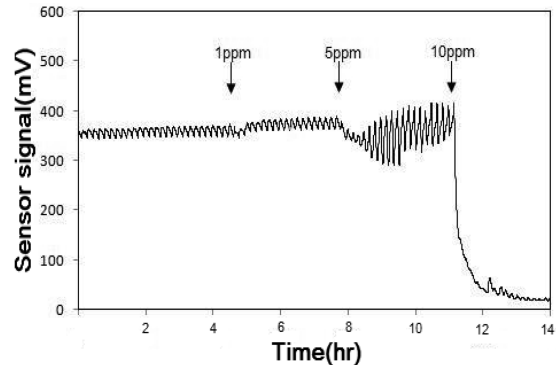


Fig. 9. Effects of Cd on toxic sensor.

3.7. Cd의 농도에 따른 유해물질 감지 센서의 변화

농화배양된 유해물질 감지 센서에 카드뮴 시료를 농도별로 3회 유입시켰을 때 생성되는 전압을 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 카드뮴도 크롬이나 비소와 마찬가지로 특정 농도 이상에서 독극물 센서의 전압이 크게 감소하였다. 카드뮴 1 ppm이 유해물질 감지 센서내로 유입되었을 때에는 전압이 10 mV 감소하였으며 이때 10분간의 coulomb yield는 0.425C로 무부하 상태인 0.434C보다 2% 감소하였다. 카드뮴 5 ppm이 센서 내로 유입 되었을 때에는 50 mV 감소 후 센서가 안정화 되며 센서의 신호의 변화폭이 커졌다. 이때의 10분간의 coulomb yield는 0.386C로 무부하 상태인 0.434C보다 11% 감소하였다. 카드뮴 10 ppm이 센서 내로 유입 되었을 때에는 300 mV 감소하였으며 10분간의 coulomb yield는 0.022C로 무부하 상태보다 95% 감소하였다. 이는 카드뮴 1.5 ppm의 농도에서는 미생물 내 효소들이나 세포막이 손상을 입지 않는 농도이지만 10 ppm에서는 미생물 내 효소들이 활성을 잃거나 카드뮴에 의해서 미생물 막이나 환원성 물질들이 산화되어서 독극물 센서의 전압이 감소 후 회복되어지지 않는 것으로 보인다.^{11,27-30)}

4. 결 론

본 연구에서 도출된 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 유기물 농도 증가에 따라서 독극물 센서의 전압은 증가하였으며 5 ppm 증가 시 약 10 mV 증가하였다.
- 2) 시료 내의 용존산소가 4 ppm 증가 시 유해물질 감지 센서의 전압은 100 mV 감소하며 용존산소가 4 ppm 감소 시 40 mV 증가하였다.

3) 암모늄 이온의 농도가 1 ppm에서 5 ppm으로 증가함에 따라 미생물 대사가 활성화 되어 유해물질 감지 센서의 전압이 20-30 mV 증가하였다.

4) 질산염 1 ppm이 유해물질 감지 센서내로 유입 시 전압은 80 mV 감소하였으며 5 ppm 유입 시에는 500 mV 감소하였다.

5) Cr^{6+} 1 ppm과 5 ppm을 유해물질 감지 센서내로 유입 시 전압은 20-30 mV 감소하며 Cr^{6+} 을 함유하지 않은 시료를 유입 시 Cr^{6+} 을 유입하지 않은 전압으로 전압이 회복되지만 10 ppm 유입 시에는 전압이 250 mV 감소되며 Cr^{6+} 을 함유하지 않은 시료를 유입 시 유해물질 감지 센서의 전압이 무부하 상태로 회복되지 않았다.

6) As 1 ppm과 5 ppm을 유해물질 감지 센서내로 유입 시 전압은 40-120 mV 증가하며 As를 함유하지 않은 시료를 유입 시 As를 유입하지 않은 전압으로 전압이 회복되지만 10 ppm 유입 시 전압은 200 mV 감소하나 이후 As를 함유하지 않은 시료를 유입 시 유해물질 감지 센서의 전압이 3시간에 40-50 mV 회복되었다.

7) 카드뮴 1 ppm과 5 ppm을 유해물질 감지 센서내로 유입 시 전압은 각각 10 mV, 50 mV 감소하였으며 이후 카드뮴을 함유하지 않은 시료를 유입 시 카드뮴을 유입하지 않았을 때의 수준으로 전압이 회복되었다. 카드뮴 10 ppm을 유해물질 감지 센서내로 유입 시 전압은 300 mV 감소하였으며 이후 카드뮴을 함유하지 않은 시료를 유입하여도 전압은 회복되지 않았다.

이상과 같이 본 연구는 수계에 존재하는 유해물질이 감지센서에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 충분히 검토되었으며, 특히 유해물질 감지 센서를 농화배양 후 유기물, 용존산소, 암모늄 이온, 질산염, 6가 크롬, 비소, 카드뮴을 농도별로 유입 시켰을 때 유해물질인 6가 크롬, 비소, 카드뮴에 의한 유해물질 감지센서의 전압은 특정 농도에서 변화폭이 크게 감소하였다. 그 감소에 대한 변화폭이 200-300 mV로 나타났으며, 전압이 회복되어지지 않았다. 하지만, 유기물, 용존산소, 암모늄 이온의 농도에 따른 전압의 변화폭은 20-100 mV로 나타났으며, 질산염의 농도에 따른 전압의 변화폭이 50 mV-300 mV로 나타났으나 전압이 회복되는 결과(결과는 제시하지 않음)를 나타내었다.

따라서, 실제 현장 적용 시 독극물과 수질 변화에 의한 독극물 센서의 전압의 변화 차이가 다르게 나타나기 때문에 유해물질에 대한 생물경보가 가능한 시스템

으로 판단되었으며, 향후 다양한 독성물질 등에 반응성 및 재현성 등에 대한 연구가 진행된다면, 2011년부터 시행하는 산업폐수 생태독성 배출규제에 사용되는 시험종을 다양화할 때 향후 본 연구에서 수행된 결과를 토대로 더욱더 현장적용성에 대한 안정성 및 감지성능의 향상을 위한 유용한 자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 조수현, 강미아, 추용엽, 정교철, 정동희, 이준홍, *The Journal of Engineering Geology*, **2006**, 16, 373-379
2. 최양호, 노영재, 이주희, 최승현, *한국환경과학회*, **2005**, 14(2), 147-157
3. Jennings, V. L., Rayner-brandes, M. H., and Bird, D.J., *Water Res*, **2001**, 35, 3448-3456
4. Lechelt M., Blohm W., Kirschneit B., Pfeiffer M., Gressens E., Liley J., Holz J., Luring C. and Moldaenke C., *Environ. Toxicol*, **2000**, 15, 390-400.
5. Pascal, R., Marc, L., Christos, P., Gilles, R., Erwan, S., Sophie, G. S., Herve, T., and Raule, V, *Ecotoxicol. Environ. Saf*, **2000**, 47, 186-194.
6. 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙, 환경부, **2007**.
7. 이승은, 이성규, 한국수질보전학회지, **1996**, 2, 119-126
8. 임병진, 박수영, 변명섭, 이철우, 임은숙, 윤승모, *Korean Journal of Limnology*, **1996**, 2, 119-131.
9. 하현중, 김성태, 최종욱, 민선홍, 장태연, 김건홍, *Korean Journal of Limnology*, **1995**, 3, 369-376.
10. Myers, C. R. and Myers, J. M., *J. Bacteriol*, **1992**, 174, 3429-3438.
11. 윤수미, 김미아, 신성혜, 진길주, 현문식, 강동효, 김형주, *대한환경공학회*, **2004**, 26, 522-528.
12. Kim, B.H., Park, H.S., Kim, H.J., Kim, G.T., Chang, I.S., Lee, J., and Phung, T.N, *Appl. Microbiol Biotechnol*, **2004**, 63, 672-681.
13. Kim, B.H, Ikeda, T., Park, H.S., Kim, H.J., Hyun, M.S., Kano, K., Takagi, K., and Tatsum, H, *Biotech. Tech*, **1999**, 13, 475-478.
14. Mia Kim, Su Mi Youn, Sung Hye Shin, Ji Gu Jang, Seol Hee Han, Moon Sik Hyun, Geoffrey M. Gadd and Hyung joo Kim, *J. Environ. Monit*, **2003**, 5, 640-643.
15. 강귀현, 장재경, 이지영, 문현수, 장인섭, 김종민, 김병홍, *대한환경공학회*, **2004**, 26(1), 58-63.
16. Ampai Kumlanghan, Jing Liu, Panote Thavarungkul, Proespichaya Kanatharana, Bo Mattiasson, *Biosensors and Bioelectronics*, **2007**, 22, 2939-2944.
17. Von Canstein H, Ogawa J, Shimizu S, Lloyd JR. *Appl*

- Environ Microbiol*, **2008**, 4(3), 615-23.
18. Marsili E., Baron D.B., Shikhare I.D., Coursolle D, Gralnick J.A., Bond D.R., *Proc Natl Acad Sci USA*, **2008**, 105(10), 3968-73.
 19. Myers, J.M., Myers, C.R, *Applied and environmental microbiology*, **2001**, 67(1), 260-269.
 20. Beliaev, A.S., Saffarini, D.A., McLaughlin, J.L, *Molecular microbiology*, **2001**, 39(3), 722-730.
 21. Blakeney, M.D., Moulaei, T, DiChristina, TJ, *Microbiological research*, **2000**, 155(2), 87-94.
 22. DiChristina TJ, *J Bacteriol*. **1992**, 174(6), 1891-6.
 23. Coby A.J., Picardal F.W, *Appl Environ Microbiol*, **2005**, 71(9), 5267-74.
 24. 김병홍, 김형주, 박형수, 김광태, 현문식, 김미아, *Microbiology and Industry*, **1999**, 12, 34-39.
 25. In Seop Chang, Hyunsoo Moon, Jae Kyung Jang, Byung Hong Kim, *Biosensors and Bioelectronics* 20(**2005**)1856-1859.
 26. Michael T.M., John M.M., and Jack Parker, *Biology of Microorganims*. 8st ed., **1997**. 109-148, 497-499. Simon & Schuster, Viacom Company. USA.
 27. 현문식, 장인섭, 박형수, 김병홍, 김형주, 이홍금, 권개경, *산업미생물학회지*, **1999**. 27, 252-259.
 28. Lovely, D.R, *Annu. Rev. Microbiol.*, **1993**. 47, 263-290.
 29. Maier, R.M, *Environmental Microbiology*, Academic press, USA, **2000**. 363-423.
 30. Paul Singleton, Diana Sainsbury. *Dictionary of Microbiology microbiology and molecular biology(second edition)*. **1996**. p59, 410-411.