

## 미생물 연료전지를 이용한 저농도 BOD 센서

강귀현<sup>†</sup> · 장재경 · 이지영 · 문현수 · 장인섭 · 김종민\* · 김병홍

한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터 · \*국립환경연구원 한강물환경연구소

(2003년 10월 9일 접수, 2004년 1월 19일 채택)

## A Low BOD Sensor Using a Microbial Fuel Cell

Kui-Hyun Kang<sup>†</sup> · Jae-Kyung Jang · Ji-Young Lee · Hyunsoo Moon

In-Seop Chang · Jong-Min Kim\* · Byung-Hong Kim

Water Environment and Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

\*Han-River Environment Research Lab, National Institute of Environmental Research

**ABSTRACT :** A microbial fuel cell (MFC) enriched under oligotrophic conditions was studied as a low Biochemical Oxygen Demand (BOD) sensor. The MFC was improved in terms of cathode reaction and reduced oxygen diffusion into the anode compartment. The sensor was continuously operated using artificial wastewater (AWW) to investigate the characteristics of the sensor response. The maximum current generated was 0.018 mA at the feeding amount of 31.2  $\mu\text{g}/\text{min}$ . A similar MFC was used to monitor BOD values of Paldang lake. A good linear relationship was obtained between the MFC output signal and BOD<sub>5</sub> with the correlation coefficient ( $r^2$ ) of 0.981. The sensor showed the operational stability with good repeatability and reproducibility.

**Key Words :** Biochemical Oxygen Demand, Microbial Fuel Cell, Oligotroph, Low BOD

**요약 :** 음극부로의 산소환산을 줄이고 양극부 반응을 개선한 미생물 연료 전지형 BOD 센서를 강물과 같이 낮은 BOD 값을 측정하기 위하여 개발하였다. 저영양성 미생물을 이용한 미생물연료전지는 센서반응 (sensor-response)을 조사하기 위하여 인공폐수를 이용하여 연속 운전하였다. 최대 발생전류는 폐수 부하량이 31.2  $\mu\text{g}/\text{min}$ 일 때 0.018 mA였다. 또한 유사한 미생물연료전지형 BOD 센서를 팔당 상수원에 설치하여 발생하는 신호와 BOD<sub>5</sub>사이의 상관관계를 조사하였다. 이때 BOD sensor와 BOD<sub>5</sub>사이의 상관결정계수 ( $r^2$ ) 값은 0.981이었다. 미생물연료전지를 이용한 BOD sensor는 반복성과 재현성 측면에서 좋은 운전 안정성을 보였다.

**주제어 :** 생화학적 산소요구량, 미생물연료전지, 저영양성 미생물, 저농도 BOD

### 1. 서론

BOD (biochemical oxygen demand)는 수질 오염도의 중요한 지표로서 일반적인 방법으로 측정하기 위해 5일이 소요되며<sup>1)</sup> 이를 측정하는 인력의 기술 수준에 따라 그 측정값에 대한 오차가 크며 측정에 걸리는 시간이 5일 이상으로 길기 때문에 실시간 계측에는 부적합하다. 특히 호소나 상수원 등은 저농도 BOD (1~20 mg BOD) 값을 나타내는 경우가 많기 때문에 이들 폐수의 유입량 측정과 이들의 통제가 가능한 효과적인 모니터링 방법이 시급한 실정이다.

BOD의 측정은 시료를 5일간 배양한 다음 소모된 산소를 측정하는 방법으로서 이때 중요한 역할을 하는 인자는 시료내의 미생물이다. 이 때문에 미생물을 사용한 BOD 센서가 선진국에서 개발된 바 있다.<sup>2~5)</sup> 그러나 지금까지 개발

된 BOD 측정용 센서는 모두 DO (dissolved oxygen) 전극에 특정 미생물을 고정화시켜서 시료내의 산소 소비율을 측정하거나 담체에 고정화시킨 다음 시료의 산소 소비율을 측정하는 방법을 채택하고 있다.<sup>6~10)</sup> 이들 방법의 문제점은 DO 센서 자체의 낮은 해상도 (resolution)와 3일~30일 간격으로 DO 센서의 멤브레인을 교환하여야 하는 등 관리상의 어려움으로 인해 산업화된 예가 전 세계적으로 극히 제한되고 있다. 최근 일본에서는 저농도 생화학적 산소요구량을 계측하기 위해 광학섬유를 이용한 바이오센서에 관한 연구가 이루어지고 있다.<sup>11,12)</sup> 하지만 모든 제품들이 DO 센서를 사용하는 거의 유사한 측정 원리를 사용하기 때문에 기술에 대한 소유권상 국내에서 DO 센서를 이용한 BOD 센서를 개발하기는 불가능한 실정이다. 그러나 국내에서 개발된 무매개체 미생물 연료전지 (mediator-less microbial fuel cell)<sup>13~15)</sup>는 이와 같은 난점을 해결할 수 있는 새로운 기술로서 각광을 받고 있다.

무매개체 미생물 연료전지는 미생물이 전자공여체를 산화시키며 호흡할 때 발생하는 전자를 전극으로 전달하여

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: kevkang@hanmail.net

Tel: 02-958-5898

Fax: 02-958-5898

전기를 발생시키는 장치로서 1) DO 센서를 사용하지 않기 때문에 유지·관리가 쉽고 2) 폐수에 함유되어 있는 유기물이 전류로 직접 전환되기 때문에 정확도 및 재현성이 우수하여 신속하게 BOD를 측정할 수 있는 센서를 만들 수 있으며 3) 자연적으로 시스템 내에서 농화 배양된 미생물을 사용하기 때문에 용이하다는 큰 장점을 지닌다.

저자들의 기존 연구에서 전극에 고영양성 (copiotrophic) 전기화학적 활성 미생물을 농화 배양하여 고농도의 BOD를 측정하는 고농도 BOD 센서를 개발한 바 있다.<sup>15-17)</sup> 하지만 고농도 BOD 센서는 호소나 상수원 등의 낮은 BOD값의 측정에는 적합하지 않고, 저농도 폐수에서 미생물활성이 유지되지 않기 때문에 낮은 유기물 농도에서도 유기물을 산화할 수 있는 저영양성 (oligotrophic)<sup>18,19)</sup> 미생물을 이용한 센서의 개발이 요구되었다.<sup>20)</sup>

한강수계 8개 호소중 하나인 팔당호는 남한강과 북한강 및 경안천의 합류지점에 위치하며 물이 하류쪽으로 계속하여 흘러내려가는 하천형 호수로서 팔당호의 물은 한강분류에서 서울시, 인천시, 경기도 등 수도권 주민에게 공급되고 있다. 하지만 최근 팔당호의 수질은 90년대 이후 크게 악화되고 있어 팔당호를 상시 모니터링하여 유해물질로 인한 오염을 조기에 파악하고 오염의 확산을 방지하는 문제가 크게 대두되고 있다.<sup>21)</sup>

따라서 저농도 BOD센서의 개발을 위하여 저영양성 전기화학적 활성 미생물로 농화배양한 미생물연료전지를 새로이 개발하여<sup>20)</sup> 북한강하류 팔당호 유역의 원수를 실시간 모니터링하고 센서의 BOD값과 표준방법인 5일 BOD값과의 상관관계를 조사하여 측정기의 성능을 조사하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 인공폐수 및 원수

BOD 측정용 폐수는 Standard methods<sup>1)</sup>를 기준으로 BOD 표준용액을 제조하였고 BOD 농도를 10 mg/L로 제조시 유기물인 glucose와 glutamate를 각각 5 mg/L 첨가하고 기질산화로 인한 폐수의 pH 저하를 방지하기 위하여 인산염 완충액 (pH 7.0, 50 mM)을 사용하였다. Table 1에 는 유기물 이외의 기본 조성을 보여주고 있다.

**Table 1.** Composition of artificial wastewater used for the low BOD sensor

Component	Concentration (g/L)
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.37
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.088
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.04 (5 mg/L as Mg)
CaCl <sub>2</sub>	0.014 (5 mg/L as Ca)
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.01 (2 mg/L as Fe)
NaHCO <sub>3</sub>	8
Distilled Water	1000

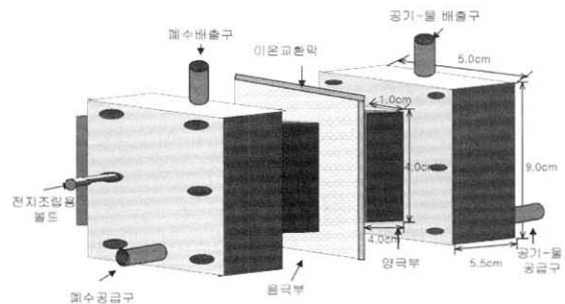
한강 원수의 계측을 위하여 북한강 하류 팔당호 유역의 실내 한 개소에 계측기를 설치하고 시료 공급관을 팔당호 유역 저층에 연결하여 펌프로 자동 채취되도록 하였으며 또한 시료를 계측기 유입직전에 별도로 채취하여 표준 방법인 BOD<sub>5</sub>로 BOD 농도를 측정하였다. 별도의 시료는 BOD 센서에 대상 원수로 사용하기 위하여 질소로 30분 이상 주입 한 후 사용하였다.

### 2.2. BOD 센서

본 연구에 사용한 생물연료전지형 BOD 센서<sup>20)</sup>는 Fig. 1과 같다. 이 BOD 센서는 양극부에서 음극부로의 산소확산을 줄이고 수소이온의 멤브레인 확산을 저해하지 않는 범위에서 멤브레인의 면적을 축소한 기존의 센서타입에서 개량된 형태로 양극부의 기존 전극으로 사용한 탄소전극 대신 백금전극을 사용하여 산소와의 친화성을 향상시킨 새로운 형태의 미생물 연료전지이다.<sup>20)</sup> 이 센서는 투명한 폴리아크릴을 사용하여 음극부와 양극부를 동일한 형태로 구성하였으며 음극부에는 탄소섬유 (10×40×5 mm<sup>3</sup>, GF series, Electrosynthesis, Amherst, NY, USA)를 전극으로 사용하였으며 양극부에는 산소에 대한 친화성이 높은 백금을 피복한 탄소섬유를 전극으로 사용하였다. 전극이 충전된 cell의 양극부와 음극부는 양이온 교환 멤브레인 (10×50 mm<sup>2</sup>, Nafion 450, Dupont CO., Wilmington, USA)으로 구분하였다. 이때 각 양극부와 음극부는 8장의 전극을 밀착하여 구성하였고 전극을 충전한 상태에서 void volume은 약 20 mL이었다. 전극사이에는 백금선 (0.5 mm 직경)의 끝을 밀착한 상태로 접촉시키고 다른 한쪽 끝은 외부의 멀티미터의 전기포트에 연결하였다. 각 양극부와 음극부로 전극과 접촉된 백금선은 저항박스를 통하여 multimeter (Model 2000, Keithley Co, USA)로 연결하여 전류를 측정하였다.

### 2.3. BOD 계측기의 현장 설치 및 운전

현장 시험을 위하여 북한강 하류의 팔당호유역 1개소에 계측기를 설치하였다. 이 지역에서 연중 측정되는 BOD는 약 2 mg/L (as BOD<sub>5</sub>) 이하로서 고민감성 센서의 시험을 위해 적절하다고 판단하였다. 시료는 자동적으로 BOD 계측기에 공급되도록 배관공사를 별도로 실시하였으며 기계의 외부적인 충격과 온도 변화에 대한 영향을 최소화하고자 실내에 설치를 하였다.



**Fig. 1.** Schematic diagram of the oligotroph-type microbial fuel cell.

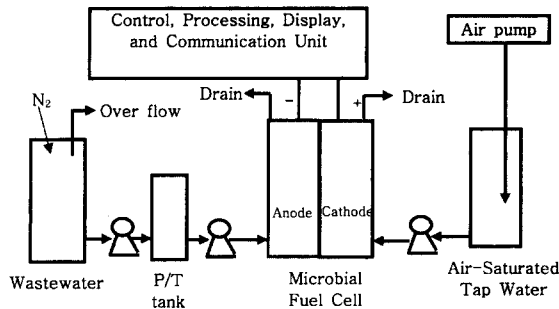


Fig. 2. Schematic diagram of the BOD analyzer system.

본 연구에 사용된 BOD 계측기 (HABS 2000)는 한국 바이오시스템사가 개발한 BOD 계측기로서 크게 전처리조, 센서 및 데이터처리장치의 세 부분으로 구분되며 이 장치에는 2종의 전처리 필터 및 각종 펌프 등이 내장되어있고 미생물 연료전지를 사용한 BOD 측정이 용이하도록 콘트롤러가 설계되어있기 때문에 기존에 개발된 이 제품을 본 실험에 사용할 수 있도록 변경하였다 (Fig. 2). 계측기의 운전은 먼저 센서의 전극면에 동일 원수로 약 1달간 농화배양한 후, 1차 전처리조로 과량의 원수를 유입하고 온도를 33 °C로 유지하였으며 이때 원수에 포함된 산소를 제거하기 위하여 질소가스를 주입하는 시스템을 적용하였다. 1차 전처리조에서 산소가 제거된 원수는 다시 센서에 유입하기 위하여 2 mL/min의 유속으로 일정시간동안 (기계의 환경설정 변수에서 S1) 주입을 하고 난 후 공급을 멈추게 작동하였다. 이 후 일정시간 (기계의 환경설정 변수에서 S7)동안 누적되는 쿨롱값을 모니터링하였다. 또한 결과의 모니터링은 계측기의 설치위치가 실험실과 원거리임을 감안하여 Tele-Metering System (TMS, 9.6 Kbps, 한국통신)을 설치하여 측정 BOD값을 실시간으로 확인하였다.

2.4. 분석방법

전압은 multimeter (Model 2000, Keithley Co., USA)를 이용하여 측정하였으며 data acquisition system (Testpoint, Capital Equipment Co., Richmond, VA, USA)을 이용하여 5분 간격으로 전기적 신호를 측정하였다. 측정된 전압은 옴의 법칙 ( $V = IR$ )에 의하여 전류로 환산하였다. 시료의 유기물농도는 HACH사 ultra low COD분석시약 (Ultra low grade, HACH Co., Loveland, CO, USA)을 이용하여 측정하였다. 쿨롱수율은 (실험 최대 전하량/이론적 전하량) × 100으로 산출하였다. 이론적 전하량은 소비된 COD에서 이론적으로 얻을 수 있는 전하량으로  $\Delta\text{COD (mg/L)} \times \text{작동 부피(L)} \times 12 \text{ C/mg COD}$ 의 식으로부터 계산되었다.<sup>17)</sup>

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공폐수를 이용한 저농도 BOD센서의 연속 운전

센서에서 발생하는 전기적 신호를 연속적으로 모니터링 하기위하여 6 mg/L의 초기 인공폐수농도를 0.15, 0.7, 1.54,

2.25, 2.60, 3.90, 5.20, 6.5 mL/min의 조건에서 각각 연속적으로 공급하여 이 때 발생하는 전류값을 조사하였다. 회로의 저항은 500 ohm으로 유지하였으며, 연료전지 운전 챔버는 약 33°C로 항온 유지하였다. 전류 발생은 전반적으로 안정적이었으며 최저 유입량인 분당 0.9 µg (0.15 mL/min)의 조건에서도 센서의 효능은 아주 뛰어남을 알 수 있었다. 전류값은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 공급속도를 높임에 따라 점차 증가하여 5.2 mL/min의 조건에서 0.018 mA로 최대 전류값을 보였으며 그 이상 유속을 증가할 경우 전류는 증가하지 않았다. 이로서 분당 31.2 µg (5.2 mL/min)의 연료량은 본 연료전지의 운전에서 포화농도임을 알 수 있었으며 쿨롱수율을 비교한 결과 가장 낮은 유속인 0.15 mL/min에서 수율 4.4%로서 가장 높았으며 유속이 높을수록 쿨롱수율은 감소하는 경향을 보여 고속운전은 비효율적임을 알 수 있었다 (Table 2).

3.2. 저농도 BOD계측기의 농화배양

현장에서 직접 농화배양을 실시하기 위하여 센서용 셀 (Fig. 1)을 제작하여 BOD 계측기에 장착하였다. 농화배양이 종료되었다면 S1 (feeding pump on time)이 on mode인 시점동안에 전류가 일정 수준에 도달하여 지속이 될 것이

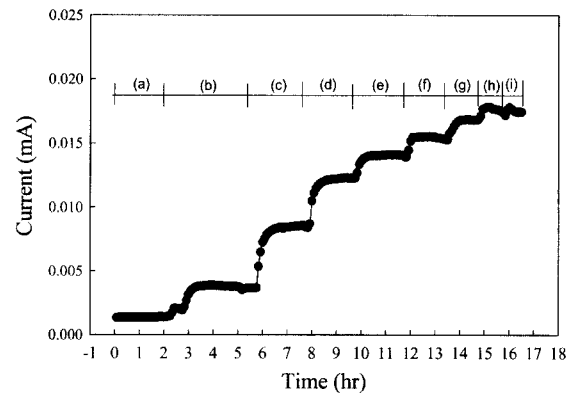


Fig. 3. The relationship between the anode flow rate and the current output from the oligotroph-type MFC continuously fed with AWW.

The fuel cell was operated at 33°C using a resistance of 500 ohm. AWW of 6 mg/L was fed as fuel at the various feeding rate. Air-saturated water was fed to the cathode compartment at the same rate. Anode feeding rate (mL/min) : (a) 0, (b) 0.15, (c) 0.70, (d) 1.54, (e) 2.25, (f) 2.60, (g) 3.90, (h) 5.20, (i) 6.50.

Table 2. Effects of the anode flow rate on the coulomb yield of the oligotrophic-type MFC operated under a continuous mode using artificial wastewater

Anode flow rate (mL/min)	0.15	0.70	1.54	2.25	2.60	3.90	5.20	6.50
Coulomb yield (%)	4.40	1.43	0.98	1.04	0.96	0.73	0.86	0.69

며 만약 S1이 유지되는 시간이 길어질수록 최대 전류값이 유지되는 시간이 길어질 것으로 판단되었다. 또한 동일한 개념으로 S7 (feeding pump off time) 이 유지되는 동안 전류가 기준선까지 떨어질 것으로 판단하였다. 농화배양이 현장에서 종료된 것을 확인하기 위하여 농화배양을 시작한 시점에서 약 1달이 경과한 후 BOD 측정기의 S1과 S7 mode를 각각 7분과 50분으로 변화시키면서 나타나는 전류의 변화를 분석하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 전류발생은  $3.1 \pm 0.1$  mA로서 상당히 안정적임을 알 수 있었다.

### 3.3. 저농도 BOD측정기의 보정곡선

BOD센서에서 얻은 전기적 신호와 원수 BOD 농도와와의 상관관계를 구하기 위하여 BOD 센서를 포함한 측정기에 유입되기 직전의 시료를 채취하여 5일 BOD를 측정하여 기본값으로 정하고 최소 및 최대 농도를 갖는 시료는 희석 및 농축방법을 이용하여 준비하였다. 센서의 응답시간은 7분이었으며 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 측정기의 신호와 5일 BOD값은 선형관계를 나타내었다. 재현성 조사를 위해서 BOD 1 mg/L의 시료를 5회 측정한 결과  $\pm 20\%$ 의 에러범위를 보였다.

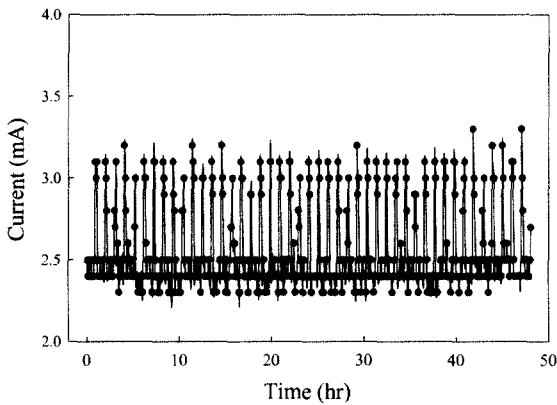


Fig. 4. Current generated from the low BOS sensor fed with Bukhan river water.

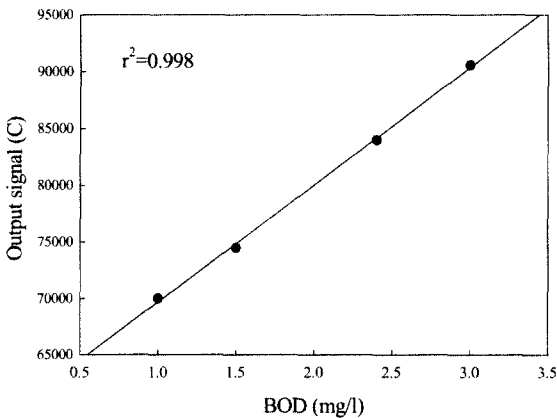


Fig. 5. Calibration curve obtained using the low BOD analyzer.

### 3.4. 저농도 BOD측정기의 현장운전

저영양성 미생물로 농화배양된 미생물연료전지를 센서로 이용한 저농도 BOD측정기를 2002년 10월 현장에 설치 후 2002년 11월부터 2003년 2월까지 기계에서 발생하는 BOD 값과 5일 BOD값을 비교하였다. Table 3은 월별 평균값을 표로 나타낸 것으로서 4달 동안 측정된 두 값은 전반적으로 일치함을 알 수 있었다. 본 실험에서 측정된 겨울철 4달간의 발생 전류는 약 2.3~3.5 mA로 신호는 대체로 안정적이었으며 BOD값의 경우 모니터링 초반 (11월)에는 평균 1.4 mg/L로 5일 BOD 값 (1.2 mg/L)과의 다소 차이를 보이다가 운전이 진행되면서 보다 근소한 차이를 보였는데 이러한 차이는 측정기를 운전하는 중에 5일 BOD값을 수시로 측정하여 측정기 값을 보정해 준 결과로서 본 연료전지를 현장에서 설치 후 계속적으로 운전해 오면서 연료전지내 농화배양된 미생물이 원수내의 유기물을 분해할 수 있는 능력이 점차 향상되어 동일농도에 비해 측정기로부터 발생되는 전류가 증가한데서 기인하는 것으로 사료된다. 한편 다른 계절에 비해 측정기의 유지관리가 어려운 겨울철 동안 약  $-10^{\circ}\text{C}$ 까지 내려가는 아주 낮은 기온에도 불구하고 측정기의 운전상태는 아주 양호하였는데 이는 시료공급관이 팔당호유역 저층에 연결되어있으며 측정기의 설치장소가 실내임은 물론 미생물의 활성을 유지하기위해 측정기 내부를 약  $33^{\circ}\text{C}$ 로 항온 유지함으로써 가능한 것으로 여겨진다.

Fig. 6은 다양한 BOD농도를 갖는 원수를 BOD센서로 측정하고 표준방법인 5일 BOD값과의 상관관계를 조사한 결

Table 3. Comparison of BOD mean values analyzed by the sensor with those determined by the 5-day BOD method for Bukhan river water during winter season

River water sample	Observed BOD values (mg/L)*	
	BOD <sub>5</sub> method	BOD sensor
November	1.2 ± 0.11	1.4 ± 0.1
December	1.0 ± 0.09	1.1 ± 0.1
January	0.9 ± 0.08	1.0 ± 0.1
February	0.8 ± 0.05	0.9 ± 0.1

\* All values are average of three experiments

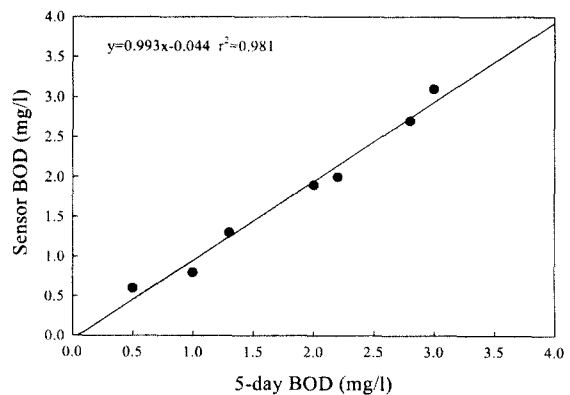


Fig. 6. Comparison of BOD values obtained by the sensor with those determined by the BOD<sub>5</sub> method.

과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 방법은 잘 일치하였는데 ( $r^2 = 0.981$ ), 이는 본 연구에 사용된 BOD센서는 미생물연료 전지로서 농화배양단계에서 원수내의 성분을 생분해할 수 있는 미생물균집이 형성되므로 센서의 민감성이 아주 우수하다고 설명된다. 또한 단일 미생물이 아닌 혼합미생물의 사용으로 원수내의 여러 성분을 분해할 수 있어 센서로서 큰 장점을 지닌은 물론 재현성 및 정확성이 아주 높았다.

#### 4. 결론

호소 및 상수원과 같은 저농도 BOD값을 갖는 원수의 실시간 모니터링이 가능한 저농도 BOD 센서를 개발하였다. 이 센서는 저영양성 전기활성 미생물로 농화배양된 새로운 형태의 미생물연료전지로서 인공폐수를 이용한 실험실 운전에서 분당 31.2  $\mu\text{g}$ 의 연료공급시 0.018 mA로서 최대 전류값을 보였으며 시그날은 전반적으로 안정적이었다. 현장에 설치된 저농도 BOD계측기로부터 측정된 겨울철 북한강 하류의 BOD는 0.9~1.4 mg/L의 값을 보였으며 5일 BOD 값과 비교시 높은 정확도를 보였다. 또한 원수를 BOD센서와 5일 BOD로 분석 후 상관관계를 조사한 결과  $r^2 = 0.981$ 로 높은 일치도를 보임을 알 수 있었는데 이는 원수에서 서식하는 미생물로 직접 농화배양하는 미생물연료전지만의 큰 장점으로서 본 연구에서 새로이 개발된 BOD 시스템은 정확도, 안정성이 우수하였고  $\pm 20\%$ 의 에러범위를 갖는 재현성을 나타내었다.

#### 사 사

본 연구는 국가지정연구실사업 (National Research Laboratory)과 한국과학기술연구원 금수강산 21의 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. APHA., *Standard Methods for the Examination of Waters and Waste Waters*. 20th ed. American Public Health Association, Washington D.C., U.S.A(1998).
2. Chan, C. Y., Lehmann, M., Chan, K. M., Chan, P. Y., Chan, C. W., Gruendig, B., and Kunze, G., "Designing an amperometric thick-film microbial BOD sensor," *Biosens. Bioelectron.*, **15**, 343~353(2000).
3. Hikuma, M., Suzuki, H., Yasuda, T., Karube, I., and Suzuki, S., "Amperometric estimation of BOD by using living immobilized yeast," *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **8**, 289~297(1979).
4. Hyun, C. K., Tamiya, E., Takeuchi, T., Karube, I., and Inoue, N., "Novel BOD sensor based on bacterial luminescence," *Biotechnol. Bioeng.*, **41**, 1107~1111(1993).
5. Karube, I., Matsunga, T., Mitsuda, S., and Suzuki, S., "Microbial electrode BOD sensors," *Biotechnol. Bioeng.*, **19**, 1535~1547(1977).
6. Kulys, J. and Kadziauskiene, K., "Yeast BOD sensor," *Biotechnol. Bioeng.*, **22**, 221~226(1980).
7. Liu, J., Bjornsson, L., and Mattiasson, B., "Immobilised activated sludge based biosensor for biochemical oxygen demand measurement," *Biosens. Bioelectron.*, **14**, 883~893(2000).
8. Sangeetha, S., Sugandhi, G., Murugesan, M., Murali Mudhav, V., Berchmans, S., Rajasekar, R., Rajasekar, S., Jeyakumar, D., and Prabhakara Rao, G., "*Torulopsis candida* based sensor for the estimation of biochemical oxygen demand and its evaluation," *Electroanalysis.*, **8**, 698~707(1996).
9. Tan, T. C., Li, F., and Neoh, K. G., "Measurement of BOD by initial rate of response of a microbial sensor," *Sens. Actuators.*, **B10**, 137~142(1993).
10. Yang, Z., Suzuki, H., Sasaki, S., McNiven, S., and Karube, I., "Comparison of the dynamic transient- and steady-state measuring methods in a batch type BOD sensing system," *Sens. Actuators.*, **B45**, 217~222(1997).
11. Chee, G. J., Nomura, Y., and Karube, I., "Biosensor for the estimation of low biochemical oxygen demand," *Anal. Chim. Acta.*, **379**, 185~191(1999).
12. Chee, G. J., Nomura, Y., Ikebukuro, K., and Karube, I., "Optical fiber biosensor for the determination of low biochemical oxygen demand," *Biosens. Bioelectron.*, **15**, 371~376(2000).
13. Kim, B. H., Kim, H. J., Hyun, M. S., and Park, D. H., "Direct electrode reaction of Fe(III) reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **9**, 127~131(1999).
14. Kim, H. J., Hyun, M. S., Chang, I. S., and Kim, B. H., "A microbial fuel cell type lactate biosensor using a metal-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **9**, 365~367(1999).
15. Kim, B. H., Chang, I. S., Gil, G. C., Park, H. S., Kim, H. J., "Novel BOD (biological oxygen demand) sensor using mediator-less microbial fuel cell," *Biotechnol. Lett.*, **25**, 541~545(2003).
16. Chang, I. S., Jang, J. K., Kim, M. Gil, G. C., Kim, H. J., Kim, B. W., and Kim, B. H., "Continuous determination of BOD in wastewater using microbial fuel cell type of biosensor," *Biosens. Bioelectron.*, **19**, 607~613(2004).
17. Gil, G. C., Chang, I. S., Kim, B. H., Kim, H. J., Park, H. S., Kim, M., and Jang, J. K., "Operating parameters affecting the performance of a mediator-less micro-

- bial fuel cell," *Biosens. Bioelectron.*, **18**, 327~334(2003).
18. Keshtacher-Liebson, E., Hadar, Y., and Chen, Y., "Oligotrophic bacteria enhance algae growth under iron-deficient conditions," *Appl. Environ. Microbiol.*, **61**, 2439~2441(1995).
19. Saito, A., Mitsui, H., Hattori, R., Minamisawa, K., and Hattori, T., "Slow-growing and oligotrophic soil bacteria phylogenetically close to *Bradyrhizobium japonicum*," *FEMS Microbiology Ecology*, **25**, 277~286(1998).
20. Kang, K. H., Jang, J. K., Pham, T. H., Moon, H., Chang, I. S., and Kim, B. H., "A microbial fuel cell with improved cathode reaction as a low biological oxygen demand sensor," *Biotechnol. Lett.*, **23**, 1357~1361(2003).
21. 경기개발연구원. 팔당상수원 수질개선 방안에 관한 연구(1997).