

휴대용 용존산소 측정 시스템의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Portable Dissolved Oxygen Measurement System

장중원*, 이성필*

Choong Won Chang and Sung Pil Lee

요약

스크린 프린트법으로 저가형 후막 용존산소 센서를 제작하고, 휴대용 용존산소 측정 시스템을 구현하였다. 전류 특성은 인가전압(바이어스 전압)을 0.7 V로 하였을 때, 응답시간도 짧고 전류 값의 변화도 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 시스템의 구현은 MCU, 증폭단, 필터단, 전원부 및 디스플레이로 구성하였다. 용존산소 농도는 아날로그 값을 디지털로 변환하여 백분율로 표현되도록 프로그램하였다. 제작된 용존산소 측정 시스템은 표준 용액 대비 오차 $\pm 0.5\%$ 의 정확도 및 약 100초의 응답시간을 나타내어 고가의 상용 용존산소 센서를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

The dissolved oxygen (DO) sensors were fabricated by screen printing method, and potable dissolved oxygen measurement system was fabricated for low cost products. The fabricated sensors had high current change and fast response according to dissolved oxygen concentrations in the applied voltage of 0.7 V. The DO measurement system was consisted of MCU, amplifier, filter, power supply and display. DO concentrations were programed to display as digital percentages by converting the analog value. It is expected that the fabricated DO measurement system can replace the expensive commercial DO meter, because it reveals the high accuracy of $\pm 0.5\%$ to the standard solution and the response time of about 100 sec like the commercial DO meter.

Keywords: Dissolved oxygen meter, DO sensors, Screen print, Low cost, fast response

I. 서론

오늘날 우리 주변의 수질은 점점 오염되어 세계 각국에서 '수계 살리기 운동'이 전개되고 있다. 특히 공장밀집 지역은 오염원이 밀집되어 있으므로 오염의 확산을 모니터링하고 오염원의 확산을 예측하는 기술은 매우 시급한 실정이다. 이를 위하여 무엇보다도 가장 시급하게 선행되어야 할 사항은 매 순간 변화하고 있는 수질환경의 실태를 현장에서 즉시 파악해야 하는 것이다. 수질의 상태를 파악하기 위해서는 pH, 용존산소, 수온, 전도도, TOC, VOC 등 각종 센서들의 사용이 요구된다. 그 중 용존산소 센서는 수질의 화학적·생물학적 요건을 측정할 수 있는

가장 중요한 센서이지만 아직까지도 가격이 매우 비싸다.

또한 센서전극의 세정은 2주마다 센서 전극의 교환은 6개월마다 해야 하고, 정밀 측정의 경우 센서를 주기적으로 교체할 해야 하기 때문에 실시간 측정의 걸림돌이 되고 있다.

용존(dissolved oxygen) 산소는 물에 녹아있는 분자상의 산소를 의미한다[1]. 용존 산소센서는 용액에 녹아 있는 용존 산소를 측정하는 것으로 이는 물 속 생물들의 호흡에 쓰이고 화학적으로 산화제로도 사용된다. 또한 용존 산소는 의료 및 환경 분야에서도 용존 산소 농도에 대한 정확한 측정은 필수적으로 부각되고 있다. 거의 모든 오염 물질이 산소를 소비하면서 분해되므로 수중의 용존 산소 농도 변화는 매우 중요하며 이 오염 현상을 방지하기 위하여 하폐수 처리장에서는 산소를 공급하면서 오염 물질을 생화학적으로 처리하고 있다.

특히 수질 환경 측정 장비 중 용존산소 미터는 가장 기본적인 계측기이다. 지금까지 널리 알려진 대표적인 용존 산소 측정용 센서로는 Clark형[2]이 있다. 특히 Clark

* 경남대학교 전자공학과

투고 : 2007. 12. 06 수정완료 : 2008. 7. 22

계재확정일자 : 2008. 7. 25

* 본 연구는 2007학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원으로 이루어졌음

형 용존 산소센서는 용존 산소 측정에 널리 사용되나 전극이 굵거나 백금의 벌크 형태로 되어 있어 매우 고가이다. Clark형 용존 산소센서가 발표된 이후 박막형 기술에 기반을 둔 산소 센서에 관한 연구들이 많이 이루어지고 있으며[3, 4], 이에 따른 가스 투과막 등과 관련하여 제조 과정, 전기 화학적 동작 및 특성에 관한 방대한 자료들이 보고되고 있다 [5-9].

본 연구에서는 기존의 방법과 달리 저가형 용존산소 센서를 개발하기 위해 스크린 프린트 법을 이용하여 빗살 모양의 용존 산소센서를 제작하였다. 또한 제작된 용존산소 센서의 특성에 맞는 휴대용 용존산소 측정 시스템을 설계 및 제작하고 그 특성을 조사하였다. 본 연구에서 제작된 용존 산소 측정 시스템을 이용하면 하천수 및 해양수의 지속적인 용존산소의 측정, 생활하수, 축산폐수, 양식업, 및 공장폐수의 유입이 예상되는 지점의 오염원 추적 및 감시체제 확립, 적조 등에 따른 수산물 피해에 대한 오염원인 파악 그 정도를 규명하고 각종 폐수, 오수 처리 관리에 응용될 수 있다.

II. 후막형 용존산소 센서

2.1 후막형 용존산소 센서의 제작

후막형 용존산소 센서는 스크린 프린트 법을 이용한 것으로 백금 전극 Pt가 인쇄될 마스크와 기준전극 Ag/AgCl이 인쇄될 마스크 두 개를 준비한 후 알루미늄 기판 위에 원하는 물질을 각각 인쇄하였다. 먼저 Pt를 프린팅하여 1100 °C에서 30분 동안 열처리를 하고, 그 후 Ag/AgCl을 프린팅하여 150 °C에서 40분간 열처리하였다. Pt를 먼저 열처리한 이유는 Pt의 열처리 온도가 Ag/AgCl 보다 높기 때문이다. 제작된 샘플의 두께는 약 15 μm 정도였다. 그림 1은 후막형 용존 산소센서의 개략도와 제작된 사진을 나타낸 것이다.

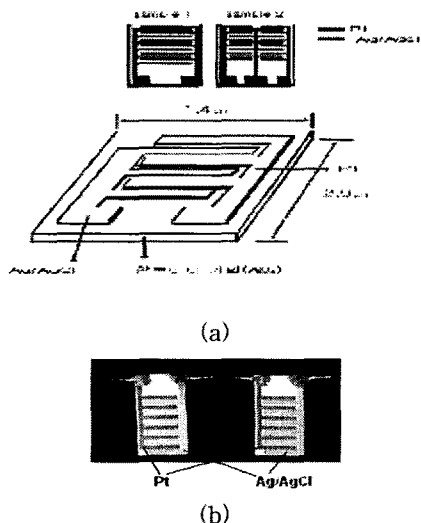


그림 1. 후막형 용존산소 센서; (a) 개략도, (b) 센서 사진
Fig. 1. Thick film DO sensors; (a) Schematic view,

(b) Photograph of fabricated sensors

용존산소 센서를 필드에서 측정하기 위해서는 약한 격막(membrane)을 보호하고 충격에 견딜 수 있는 케이스의 제작이 매우 중요하다. 격막의 장착 방법, 누수방지 및 전해액의 충전 등이 요구되는 기술이다. 그림 2는 필드에서 측정이 가능하도록 설계된 용존산소 센서 케이스의 설계도이다. 전체 크기는 샘플의 크기에 맞게 가로 180 mm, 세로 380 mm로 제작하였다. 하단부분은 산소만 투과할 수 있도록 테프론 격막이 막개에 끼워 넣어졌다. 격막이 있는 쪽 외에는 2중으로 고무링을 설치하여 외부의 물이 샘플 안으로 들어오는 것을 차단시켰다. 케이스 안에는 전해액으로 반포화 상태의 KCl을 넣어 밀봉시켰다.

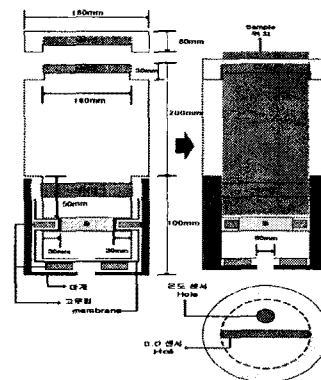


그림 2. DO 센서 케이스의 단면도와 평면도
Fig. 2. Cross section and top view of DO sensor case

후막형 용존산소 센서를 측정하기 위해 사각의 플라스틱을 제작하여 증류수를 채운 다음 10분 동안 산소를 증류수에 주입하면서 산소 농도증가에 따른 전류 변화를 관찰하였다. 전해액으로 채워진 센서를 측정할 때 Pt 성분으로 된 동작전극의 (-)와 Ag/AgCl로 만든 기준전극의 (+)에 0.6~0.8 V의 전압이 인가되면, 용존산소가 격막을 투과하여 센서 내부로 들어가게 되고, 내부의 전극 표면에는 전기 화학 반응이 일어나 전류가 흐르게 된다. 이 경우 흐르는 전류의 크기는 일정 조건 하에서 용존 산소 농도에 비례하므로 이 전류 측정으로 용존 산소 농도를 알 수 있다. 즉 격막을 투과한 산소 분자가 동작 전극에서 기준 전극으로 전자의 흐름이 발생되어 전류가 흐르게 된다. 이 전류변화를 반도체 소자 분석기로 측정하였다. 이 전류 값은 시스템 제작 시 전류 범위를 결정하는데 사용된다.

그림 3은 제작된 후막형 용존산소 센서를 사용하여 전압을 0.7 V로 인가했을 때의 전류 변화 특성을 조사한 것이다. 그림 3에서 종축은 전류를 횡축은 시간을 나타내는데, 전류가 포화치의 90%에 도달하는데 걸리는 시간이 약 100초 정도였고, 전류는 4.2 μA에서 21.3 μA로 증가하였다. 포화치에 도달하는 시간은 약 120초였다.

제작된 샘플과 현재 가장 많이 사용되고 정확도가 가장 높은 A사의 용존산소 센서를 비교 측정된 결과를 그

림 4에 나타내었다. 본 연구에서 제작한 후막형 용존산소 센서와 상용 벌크형 용존산소 센서 공히 물속에 녹아있는 용존 산소와 반응하여 소자의 전류가 포화점에 도달할 때까지의 시간은 약 100초로 측정되었으며, 포화치의 전류 값은 상용 용존산소 센서에 비해 약간 낮았지만 비교적 유사한 동작 특성을 얻을 수 있었다.

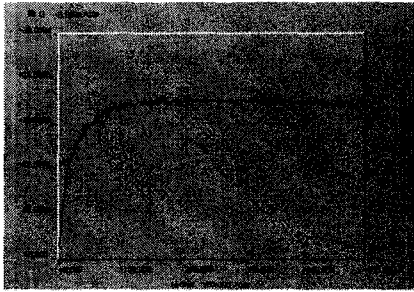


그림 3. 용존산소 센서의 응답특성 (인가전압: 0.7V)
Fig. 3. Response of DO sensor (applied voltage: 0.7V)

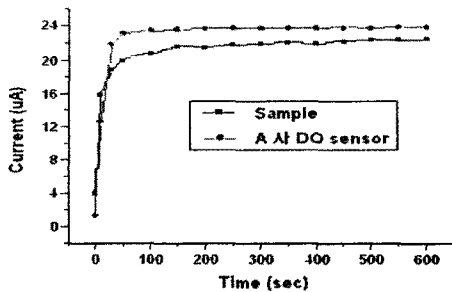


그림 4. 포화 용존산소에서의 응답특성 비교
Fig. 4. Comparison of response characteristics in the saturated DO concentration

2.2. 용존산소 측정을 위한 신호처리

그림 5는 용존산소 측정을 위한 MCU의 블록도이다. MCU는 Comfile Technology사의 PB-3B 모델을 사용하였고, 전원부, 아날로그 입력부, A/D 변환부, LCD 출력부, 키 입력부 및 통신포트로 구성되어 있다. 포화 용존산소는 온도에 따라 변화하므로 온도센서부를 추가하였고, 차기 염도센서의 측정을 대비하여 염도센서부를 추가하였다. 용존산소 측정 시 미소 전류 및 전압을 증폭할 때 온도 등에 의한 출력전압의 변동 및 입력단자에 같은 전류를 흘렸을 경우 발생하는 출력전압의 차에서 오는 오프셋 전압의 보상이 필요하다. 용존산소 센서의 포화출력이 100 uA일 경우 5V를 출력하기 위해 필요한 이득은 출력전압/변환전압이므로 V_o 가 1×10^{-3} V일 때 5000배의 이득증폭이 필요하다. 또한 안정도를 100 ppm/°C로 하기 위해서는 입력전압 스펙이 10 mV 인 경우 오프셋 전압 드리프트가 $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 이하의 저 리프트 OP앰프를 사용하여야 한다. 입력 오프셋 전압 (V_{ios})은 R_{in} 과 R_f 로 정해지는 증폭도로 증폭되고, 입력 오프셋 전류 (I_{ios})를 R_f 에 흘리므로 출력 오프셋 전압 (V_{oos})은 식 (1)로 나타

낼 수 있다.

$$V_{oos} = \left(1 + \frac{R_f}{R_{IN}}\right) V_{ios} + R_f I_{ios} \quad (1)$$

여기서 I_{ios} 는 입력오프셋 전류, V_{ios} 는 입력오프셋전압, R_{IN} 은 입력저항 그리고 R_f 는 피드백저항이다. 즉, 전류증폭용으로 사용될 때에는 입력 오프셋 전류와 피드백저항의 곱이 출력 오프셋 전압이 된다. 미소전류의 측정의 경우에는 피드백저항 R_f 가 커지기 때문에 입력 오프셋 전류가 작은 OP앰프를 사용하였다. 출력 오프셋 전압은 제로점 조정으로 제로로 조정하는 것이 가능하므로, 본 연구에서는 휴대형에 맞도록 경제성 및 범용성을 고려하여 LF356A을 적용하여 오프셋 조정회로를 탑재하는 구조로 설계하였다.

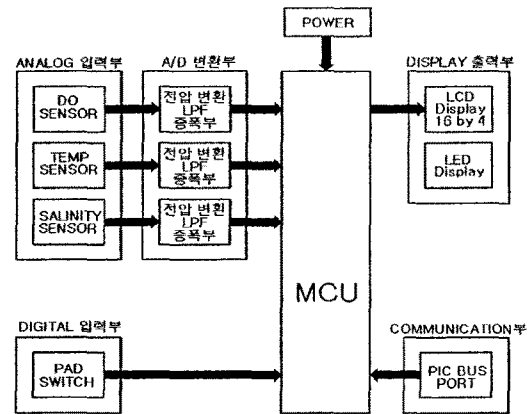


그림 5. MCU 블록도
Fig. 5. MCU block diagram

용존산소 센서의 출력은 0~100 uA의 미소전류 변화를 전기적인 신호원으로 사용하므로 A/D 콘버터의 신호원으로 사용하기 위해 전류의 변화를 전압으로 변환하는 회로가 필요하다. 그림 6은 전류-전압 변환 회로를 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 입력전압이 1 mV이므로 5V를 출력하려면 5000배의 이득증폭이 필요하다. 이득증폭률을 크게 할 경우 피드백저항을 매우 크게 해야 하는데, 이 경우 등가 입력 잡음을 증폭한 전압이 출력 측에 나타나므로 그것을 막기 위해 입력저항을 추가하든지 적당한 값의 피드백저항을 적용해야 한다. 본 연구에서는 1차 이득증폭 50배 후 2차 이득증폭 100배를 하여 피드백 저항 값을 낮추는 방법을 적용하였다.

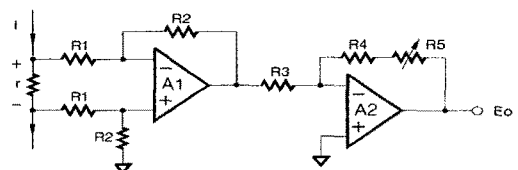


그림 6. 전류-전압 변환회로
Fig. 6. Conversion circuit of current to voltage

저역 통과 여파기는 2단 여파기를 사용하여 그림 7과 같이 구성하였다. 1단에서의 감쇄 특성은 차단주파수 이상영역에서 $V_{out} = 6 \text{ dB/oct}$ 가 되도록 하였고, 2단에서의 감쇄 특성은 차단주파수 이상영역에서 $V_{out} = 12 \text{ dB/oct}$ 가 되도록 하였다. 차단주파수와 출력 전압은 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad (2)$$

$$V_{out2} = \frac{1}{1 + R\omega C} V_{out1} \quad (3)$$

여파기의 최대평탄을 가지는 캐패시터 C_1 과 C_2 의 값은 $R_1 = R_2$ 로 하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi F_c R_1}}, \quad C_2 = \frac{1}{2\sqrt{2\pi F_c R_1}} \quad (4)$$

또한 그림 7의 여파기회로에서 펄스상의 잡음이 입력으로 빈번하게 들어오기 때문에, 펄스가 최소한의 시간으로 시정상태가 되도록 하려면 각 감쇄단의 캐패시터는 식 (5)와 같이 표현되어야 한다.

$$C_1 = \frac{R_1 + R_2}{\sqrt{3R_1 R_2 \omega C}}, \quad C_2 = \frac{\sqrt{3}}{(R_1 + R_2)\omega C} \quad (5)$$

여기서도 $R_1 = R_2$ 로 놓고 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{3\pi F_c R_1}}, \quad C_2 = \frac{\sqrt{3}}{4\pi F_c R_1} \quad (6)$$

본 연구에서는 1단 감쇄단의 캐패시터 C_1 은 $2.0 \mu\text{F}$ 그리고 2단 감쇄단의 캐패시터 C_2 는 $1.47 \mu\text{F}$ 로 각각 설정하였다.

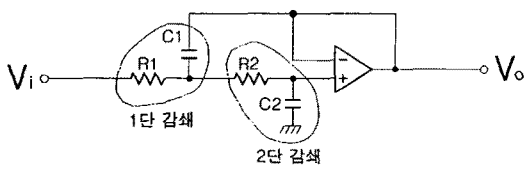


그림 7. 저역 통과 여파기
Fig. 7. Low pass filter

그림 8은 DO센서, 염도센서 및 온도센서의 신호들을 A/D 변환하기에 적당한 값으로 제공하기 위하여 설계된 저역통과 여파기 및 이득조정 회로도이다. 용존산소량과 염도는 연산 증폭기를 통해 적당한 출력 값으로 이득을 조절함과 동시에 저역통과 여파기를 통과시켜 외부 잡음에 대한 신뢰성을 높였다. 아날로그 신호는 이중채널 A/D 변환용 IC인 MCP3202를 이용하여 MCU로부터 변환명령이 주어질 때마다 변환된 값을 MCU로 전송한다. 온도는 MAX6674를 이용해 K형 열전대로부터 온도 값을

읽어 MCU로 전송한다.

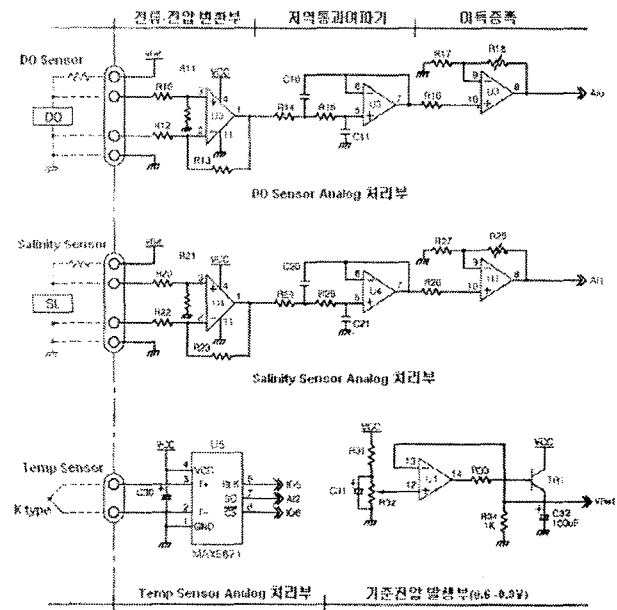


그림 8. 다중 신호 처리를 위한 아날로그 회로
Fig. 8. Analog circuit for multi-signal processor.

A/D변환회로는 12bit A/D변환기를 적용하여 4096의 분해능을 구현하였다. 본 연구에 적용된 12비트에 대응한 수치의 최상위 10 스텝 최하위 10 스텝을 계산식과 함께 표시하였다. 1 스텝은 1 LSB로서 풀 스케일 값의 $1/4096$ 인 값을 나타내어 0.00097656 V 가 되며, 12비트 바이너리가 모두 "1"일 때 아날로그 풀 스케일 값은 4V 로 되지 않고 4V 에서 1 LSB 전압을 뺀 3.999 V 가 된다.

III. 휴대용 용존산소 측정기

휴대용 용존산소 측정 시스템은 $0\sim 1 \text{ mV}$ 를 캘리버레이션터로부터 출력하여 A/D변환 회로를 거쳐 MCU에 입력하여, 변환 데이터가 $0\sim 4096$ 이 되는지 확인하였다.

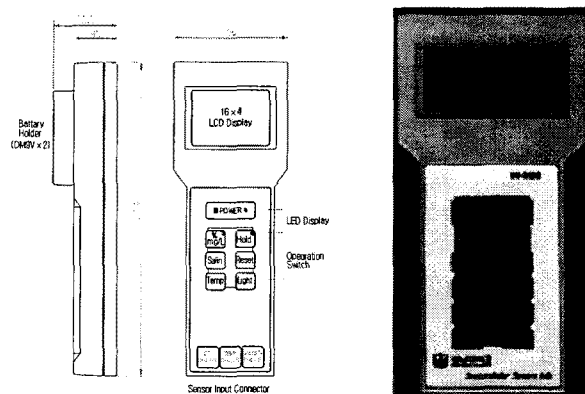


그림 9. 휴대용 용존산소 미터
Fig. 9. Portable DO meter

아날로그 변환 값 0~4096 (12bit)을 0~100 %로 표현 되도록 프로그램하여 디스플레이에 출력하였다. 이때의 출력 값은 (A/D 변환값 × 100)/4096에 의해 얻어졌다. 만약 A/D 입력치가 819일 때 용존산소 변환 값은 20 %가 된다. 그림 9는 실제 구현된 용존산소 측정장치이다. 센서로부터 읽혀진 용존산소 값과 온도 값이 LCD에 나타나고 있다. 용존산소량은 20 %이며, 수온은 25 °C임을 알 수 있다. 각부 기능 및 용도는 표 2와 같다.

표 2. 제작된 용존산소 측정 시스템의 기능
Table 2. Function of the fabricated DO measurement system

단자 표시/기호	기능 및 용도
DO[%]	용존산소량을 %로 표시
DO[mg/l]	용존산소량을 mg/l로 표시
Temp	측정온도 [°C]로 표시
Salin	측정염도 [%]로 표시
Reset	측정 데이터 리셋
Data Hold LED	측정 데이터 홀드
Power LED	전원 DC ON/OFF 표시

IV. 결 론

스크린 프린트 법을 사용하여 저가격대 후막형 용존산소 센서를 제작하고, 이를 이용하여 휴대용 용존산소 측정 시스템을 구현하였다. 후막형 용존산소 센서는 인가전압이 낮을 때 전류 값이 안정되는 시간은 짧지만 전류의 변화가 적었고, 인가전압이 높으면 전류 값이 안정되는 시간은 길지만 전류의 변화는 크게 나타났다. 본 연구에서는 인가전압을 0.7 V로 하였을 때 응답시간도 짧고 전류 값의 변화도 가장 크다는 것을 알 수 있었다 또한 제작된 센서는 기존의 상용 용존산소 센서에 비해 포화치의 전류 값은 약 3 μ A 정도 낮았지만 포화치에 도달하는 응답시간은 유사하게 나타났다. 휴대용 용존산소 측정 시스템은 전원부, 아날로그신호 입력부, A/D 변환부, 디스플레이, 키 입력부 및 통신포트로 구성하였다. 제작된 용존산소 측정 시스템은 용존산소 센서의 감도 변화에 따라 오차가 표준 용액 대비 $\pm 0.5\%$ 의 정확도를 나타냈으며, 이는 현재 시판되는 가장 정밀한 DO미터의 정확도인 $\pm 0.02\%$ 에 비해서는 낮았다. 그러나 이들 장비는 수백만원 대를 호가하기 때문에 이 보다 1/10 정도의 가격을 가지는 본 연구의 결과물은 가격 대비 성능에서 경쟁력이 있으며, 또한 일반적으로 DO미터에서 요구되는 $\pm 1\%$ 의 정확도를 만족시키기 때문에 상용 용존산소 미터를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Prudenziati, B. Morten, "Thick-film sensors-an overview", Sensors and Actuators, 10, pp. 65-82, 1986.
- [2] L. Clark, "Monitor and Control of blood and tissue oxygen tension", Trans. American Society of Artificial Internal Organs, 2, pp. 41-48, 1956.
- [3] P. Fraher and D. Clarke, "Fouling detection and compensation in Clark-type DOx sensors", IEEE Trans. on Ins. and Meas., 47, 3, pp686-691, 1998.
- [4] H. Suzuki, A. Sugama, and N. Kojima. "Miniture Clark type oxygen electrode with a three-electrode configuration", Sensors and Actuators B, Vol.2, pp. 297-302, 1990.
- [5] Linek, V., Vacek, V., sinkule, J. and Bense. P. Measurement of Oxygen by membrane Covered Probes, Ellis Horwood Ltd, 1988.
- [6] D. Mogan and S. Weber, "Noise and single to noise ratio in electrochemical detectors", Anal. Chem., 56, pp. 2560-2567, 1984.
- [7] H. Hinkers, C. Sundermeier, R. Lürrik, F. Walfort, K. Cammann, M. Knoll, "Amperometric microelectrode array in containment technology", Sensors Actuators, B 26-27, pp. 398-400, 1995.
- [8] P. Hartmman, M.J.P. Leiner, M.E. Lippitsch, "Response characteristics of luminescent oxygen sensors", Sens. Actuators B, 29 251-257, 1995.
- [9] R. Schuler and F. Kreuzer, "Rapid polarographic in vivo oxygen catheter electrodes," Respir. Physics, 3, 90-110, 1967.



장 중 원(Choong Won Chang)

2005년 경남대 전자공학과 졸업(공학석사)
2005년 현재 경남대 대학원 전자공학과 박사과정
관심분야: 반도체센서, USN용 센서 개발



이 성 필(Sung Pil Lee)

1983년 2월 경북대 전자공학과(공학사)
1985년 2월 경북대 전자공학과(공학석사)
1999년 2월 경북대 전자공학과(공학박사)

1988년 3월 ~ 현재 경남대 전자공학과 교수
※주관심분야 : 센서재료 및 시스템, 반도체센서