

논문 2001-10-4-07

FET형 용존산소 센서 어레이 측정시스템

정 훈*, 손병기**

A Dissolved Oxygen Measurement System Using FET-type Dissolved Oxygen Sensor Array

H. Jeong*, B. K. Sohn**

요 약

FET형 용존산소 센서는 pH-ISFET를 기본 소자로하여 pH 감지 게이트 근처에 백금으로 된 작업 전극을 형성한 구조를 가지고 있다. 작업전극에 특정한 전위를 인가하면 전기분해로 인하여 용존산소의 농도에 비례하는 수소 이온이 pH 감지 게이트 주변에 발생된다. 따라서 pH-ISFET를 통하여 수소 이온 농도의 변화량을 검출하면 용존산소의 농도를 측정할 수 있게된다. 본 논문에서는 이러한 FET형 용존산소 센서를 어레이 형태로 제작하여 적용하고 측정의 신뢰성을 높이기 위한 알고리즘을 도입한 FET형 용존산소 센서 어레이 측정 시스템을 개발하였다. 또한 상용 용존산소 측정기와 그 성능을 비교·분석 하였다.

Abstract

FET-type dissolved oxygen sensor has the Pt working electrode around the pH-ISFET. Applying a voltage to the working electrode, the hydrogen ion which is proportional to the dissolved oxygen concentration occurs around the pH sensing gate and we can measure the dissolved oxygen concentration by detecting pH concentration through the pH-ISFET. In this paper, a dissolved oxygen measurement system using FET-type dissolved oxygen sensor array which adopt a specific algorithm to enhance the reliability has been developed and we compared its performance with the commercial dissolved oxygen measurement system.

1. 서 론

ISFET(ion sensitive field effect transistor)는 ISE(ion selective electrode)의 감이온 특성 및 이온 선별능력과 MISFET(metal insulator semiconductor field effect transistor)의 특성을 가지고 있으

며 반도체 집적회로 공정기술로 제조되어 소형화와 대량생산이 가능하다. 이러한 반도체 능동소자를 바탕으로 한 첨단 센서인 FET형 용존산소 센서는 Clark형 센서^[1,2]와 달리 가스투과막이 없고 전위차법으로 용존산소 농도에 비례하여 선형적으로 pH변화를 감지함으로써 용존산소의 농도를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 FET형 용존산소 센서에 적합한 측정시스템을 구현함에 중점을 두었으며 6 채널의 어레이 형태의 구조를 갖는 센서 가운데 신뢰성이 낮은 센서를 제외시키는 루틴을 가진 소프트웨어 및 측정시스템을 개발하여 신뢰성을 향상시켰다.

* 경북대학교 센서공학과(Dept. of Sensor Eng., Kyungpook Nat'l University.)

** 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic & Electrical Eng. Kyungpook Nat'l University.)

<접수일자 : 2001년 6월 8일>

II. FET형 용존산소 센서 어레이 측정시스템의 구현

(1) 하드웨어 구성

지금 까지 개발된 FET형 어레이 센서 측정 시스템들은 대부분 센서와 바이어스회로 사이에 스위치를 두고 각 센서 채널의 신호를 순차적으로 읽어 들이는 방식을 취하여 왔다. 이러한 형태의 시스템은 채널의 수가 많아져도 하나의 바이어스 회로로 모든 채널의 값을 읽을 수 있기 때문에 측정시스템의 크기나 소비전력의 효율성에 있어 매우 유리하다고 할 수 있다. 그러나 측정 시간을 살펴보면 FET형 센서 각각이 가지는 용량성 성분 때문에 스위치가 켜지는 순간부터 어느 시간 까지 센서의 용량이 충전되는데 시간이 필요하게 되어 전체 시스템의 측정 시간이 채널의 수에 비례하여 늘어나는 단점을 가지고 있다. 이러한 FET형 어레이 용존산소 측정 시스템의 측정시간을 단축시키기 위하여 센서마다 개별적인 바이어스 회로를 적용하고 또한 측정에 신뢰성을 기할 수 있는 하드웨어를 설계하였다.

FET형 어레이 용존산소 측정 시스템은 크게 아날로그 영역과 디지털 영역의 두 부분으로 나눌 수 있으며 추가로 전원 영역이 포함된다. 먼저 아날로그 영역은 바이어스 회로^[3,4]와 DC 전압 조정 및 증폭 회로 그리고 작업전극의 활성화를

위한 기준전압 발생회로로 구성된다.

MPU(micro-processor unit)^[6]로 제어되는 기준전압 발생회로가 작업전극을 활성화시키면 6 채널의 용존산소 센서의 출력이 바이어스 회로를 통해서 검출된다. 바이어스 회로를 거친 센서 신호는 DC 전압 조정 및 증폭 회로를 통해 A/D 변환기의 입력 범위 내로 DC 레벨이 조정된다. 여기에서 MPU는 A/D 변환기를 통해서 들어오는 값을 읽어들이어 D/A 변환기로 적절한 전압을 피드백 시켜 전압 조정을 수행한다.

DC 레벨의 조정이 끝나면 MPU는 A/D 변환기로 들어오는 센서의 출력 값의 변화량을 용존산소의 농도로 환산하는 연산을 수행하여 그 값을 LCD 모듈에 표시한다. 측정 시스템의 전원 공급은 일반 상용전원(AC 110V~220V)를 DC 전압으로 변환 시켜주는 전원 어댑터를 통해서 이루어진다. FET형 어레이 용존산소 측정 시스템의 전체 하드웨어 구성을 그림 1에 나타내었다.

2-1-1. 6 채널 신호 처리 및 아날로그 스위치 회로

FET형 센서의 신호를 검출 방법에는 전류의 변화량을 측정하는 방식과 전압의 변화를 측정하는 방식 등 여러 가지가 있다. 여기에서는 전압과 전류를 고정 시켜놓고 유효 게이트 전압의 변화

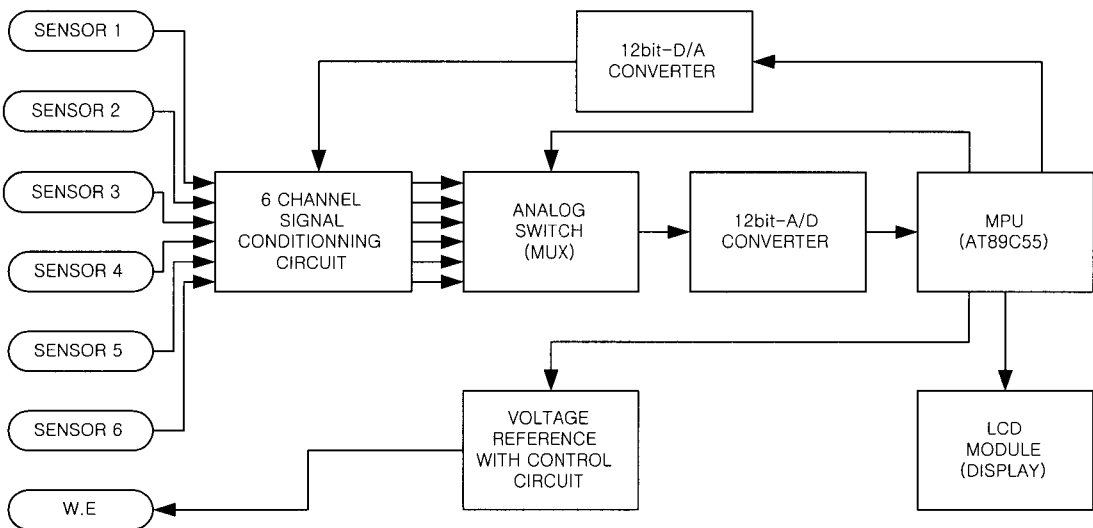


그림 1. 하드웨어 블록도
Fig. 1. Hardware block diagram.

량을 검출하는 영전위(null-balance)^[3] 방식(그림 2)을 사용하였다. 이러한 신호 검출 방식은 전류의 변화로 인해서 생기는 줄열에 의해서 발생하는 노이즈를 방지할수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 3은 영전위 방식의 FET형 센서 신호 검출 회로를 나타낸 것이다. 측정에 사용된 6채널의 FET형 센서는 모두 이 회로와 동일한 신호 검출 회로를 통해서 신호를 발생시킨다. 또한 SEN1D와 SEN1S는 채널 1번 센서의 드레인과 소스단자 연결단자를 나타내며 출력은 OUT1으로 나온다.

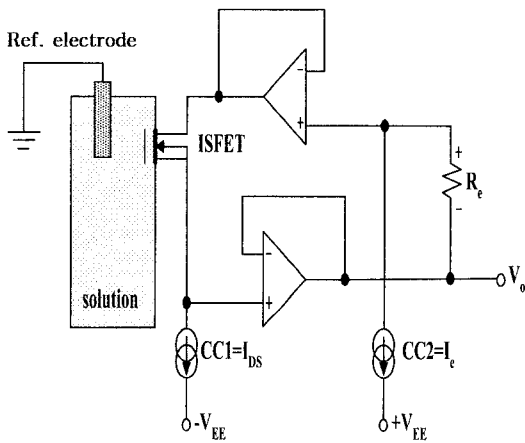


그림 2. 영 전위 회로도
Fig. 2. Null-balance circuit.

Null-balance 회로의 op-amp는 드리프트가 적고, 오프셋 전압이 작아 정밀 측정용으로 쓰이는 OP-27(Analog Device 사제)^[6]을 사용하였으며 FET 센서에 일정한 전류를 공급하기 위하여 정전류원인 LM334^[7]를 적용하였다. 다이오드 1N4148과 1 kΩ 저항은 LM334 출력 전류의 온도 계수를 영(zero)으로 하여 외부의 온도 변화에 대해 일정한 전류가 공급되도록 하기 위해 사용되었다. 제작된 FET 센서의 드레인 전류 포화시 VDS의 값은 대략 2.0 V 정도이므로 보다 깊은 포화상태 드레인 전류를 유지하면서 센서가 동작할 수 있게 만들기 위해서 VDS는 3 V IDS는 대략 128 μV로 설정하였다.

이상의 FET 센서의 신호검출 회로에서 피 측정 용액의 산소 농도변화에 대응하여 변화하는 도전성 채널이 게이트영역 아래에 형성되어 산소 농도의 변화에 대해 IDS가 변화하게 된다. 그런

데 IDS 및 VDS는 정전류원 IDS 및 24 kΩ에 의해 각각 128 μA 및 3 V로 유지되므로 이 조건을 만족시키기 위해 VS가 변화하여 채널 콘덕턴스를 제어하게 된다. 그러므로 VS에 VGS의 변화량이 직접 나타나게 되어 피 측정용액의 산소 농도의 변화를 나타낸다.

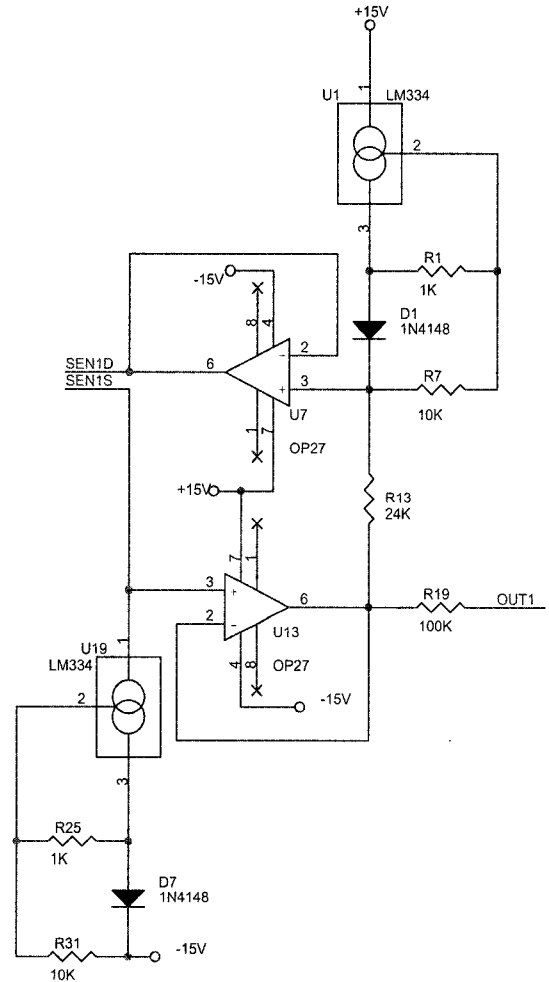


그림 3. 센서 신호 검출 회로
Fig. 3. Sensor signal detection circuit.

(2) 소프트웨어 구성

FET형 어레이 용존 산소 측정 시스템을 운용하기 위한 소프트웨어의 전체 흐름도는 그림 4와 같다. 초기에 프로그램이 시작되면 I/O 장치를 초기화한다. 초기화가 끝나면 신호검출 회로의 출력 전압을 A/D 변환기가 읽을 수 있는 범위 내로 조정하기 위하여 D/A 변환기의 출력값을

채널별로 변화시키는 자동 전압 조정을 수행한다. 이 과정에서 만약 센서가 오류를 일으켜 D/A 변환기의 전압을 최대범위로 변화시켜도 A/D 변환기의 입력전압이 프로그램에서 설정한 값으로 조정되지 않을 경우 DC 레벨의 오류가 일어난 채널의 번호를 표시하고 센서 교체 여부를 사용자에게 물어본다. 만약 센서 교체를 선택하면 프로그램은 처음의 초기화 과정으로 다시 되돌아간다. 여기에서 센서 교체를 선택하지 않으면 오류가 일어난 채널을 제외시키고 보정 과정으로 넘어간다.

시스템의 보정은 1점, 2점 및 3점 방식 중 사용자가 임의로 선택할수 있다. 2점과 3점 보정 과정에서는 보정을 마친 후에는 감도를 검사하게 되며 일반적인 센서의 감도 보다 낮은 채널의 센서 신호는 제외시키고 측정을 시작한다. 측정시에는 나머지 각 채널들의 출력 전압의 평균값을 취하여 이것을 산소의 농도로 환산하여 LCD에 표시한다.

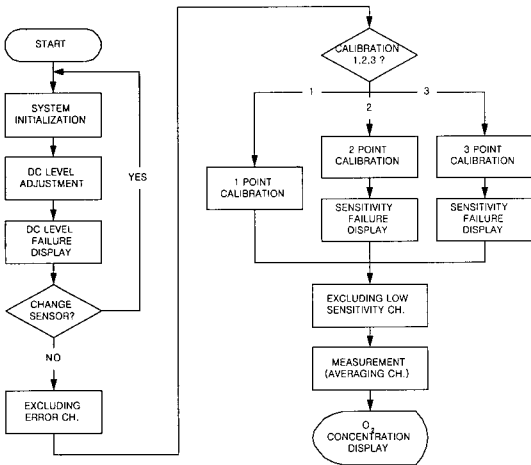


그림 4. 소프트웨어 흐름도
Fig. 4. Software flowchart.

2-2-1. 시스템 초기화 및 DC 전압 조정 과정

시스템의 전원이 켜지면 가장 먼저 초기화 과정이 실행된다. 여기에서는 먼저 MPU의 레지스터의 값을 지우고 D/A 변환기 및 LCD 모듈을 초기화한다. 시스템의 초기화 및 DC 전압 조정 과정을 그림 5에 나타내었다.

시스템의 초기화를 마치면 Opening Message를 출력하고 DC 전압 조정 과정으로 넘어간다. 이것은 신호 검출 회로를 거쳐 A/D 변환기로 들어오는

센서 신호의 DC 전압 범위를 D/A 변환기를 통해 조정하는 과정으로 다음과 같이 이루어진다. 먼저 초기에 D/A 변환기의 전압 조정 횟수를 나타내는 카운터인 counter = 1로 설정하고 D/A 변환기의 값인 DAC_value = 0V로 설정한 후 이 값을 D/A 변환기로 전압 조정 회로를 통해 피드백 시킨다. 이때 A/D 변환기의 값을 읽어 만약 그 값이 2.048V보다 클 경우 DAC_value를 $DAC_value - 2.048/2^{counter}$ 로 갱신하고 counter의 값을 1 증가시킨 후 위의 과정을 되풀이하며, 2.048V보다 작을 경우 DAC_value를 $DAC_value + 2.048/2^{counter}$ 로 갱신하고 역시 counter의 값을 1 증가시킨 후 위의 과정을 되풀이한다. 그러나 그 값이 2.048V 이거나 counter의 값이 12 일 경우 현재의 DAC_value를 저장하고 전압 조정 과정을 마친다.

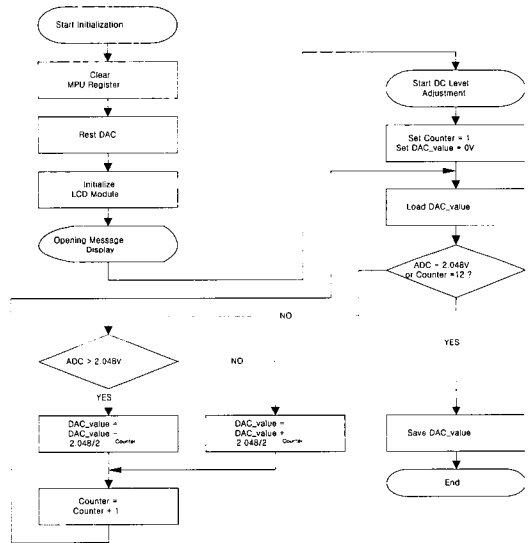


그림 5. 시스템 초기화 및 DC 전압 조정 과정
Fig. 5. System initialization & DC voltage adjustment routine.

2-2-2. DC 전압 조정 오류 판단 과정

DC 전압 조정 과정을 마치면 센서의 오류를 판단해 신뢰성을 기하기 위한 과정의 하나인 DC 전압 조정 오류 판단 과정을 거치게 되며 그 흐름도를 그림 6에 나타내었다. 오류 판단 과정이 시작되면 채널 카운터인 ch_counter = 1로 설정하고 1 번째 채널의 출력 전압을 D/A 변환기를 통해 읽어 그 값이 0.1V 보다 클 경우 현재의 채널 번호를 저장하고 ch_counter의 값을 증가시키면서 다음 채널

로 진행되어 ch_counter = 1부터의 6의 과정을 되풀이 한 후 ch_counter = 6인 경우 저장된 채널의 번호를 오류 채널로 LCD로 표시하고 사용자에게 센서의 교체 여부를 물어본다. 만약 사용자가 센서의 교체를 선택하면 시스템의 앞의 초기화 과정으로 다시 돌아가며 그렇지 않을 경우 오류 채널을 제외시키고 보정 과정으로 진행한다.

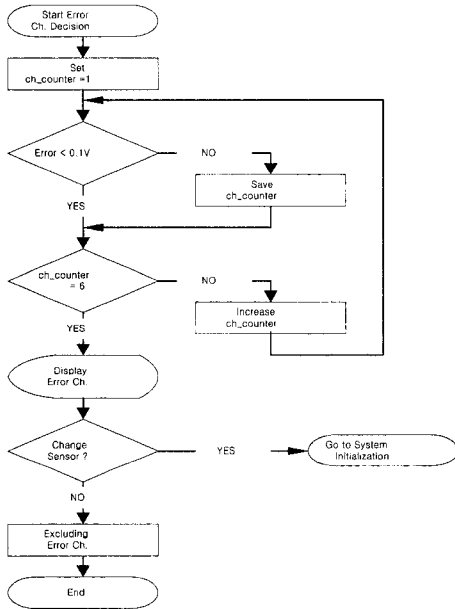


그림 6. 전압 조정 오류 판단 과정
Fig. 6. Error decision routine for DC voltage adjustment.

2-2-3. 보정 과정 및 저 감도 판단 과정

시스템의 보정은 과정을 그림 7에 나타내었다. 먼저 보정이 시작 되면 사용자는 1점, 2점 및 3점 방식 중 하나를 선택하게 된다. 먼저 1점 보정의 경우 감도의 기울기를 평균적인 산소 센서의 기울기로 고정시킨 후 보정 용액에서의 센서 출력 값을 읽어 저장하며, 2점과 3점 보정 과정에서는 각각의 보정 용액에서의 구간 감도를 구하고 센서 출력 값을 저장한다. 또한 보정을 마친 후에는 감도를 검사하게 되며 시스템의 신뢰성을 높이는 두 번째 방법으로 일반적인 센서의 감도 보다 낮은 채널의 번호를 표시한 후 이러한 채널의 신호는 제외시키고 측정 과정으로 넘어간다.

그림 8은 3점 보정 그래프를 도시화 한 것이다. S₁, S₂ 및 S₃는 각각 보정 용액의 농도를 나타내고 V₁, V₂ 및 V₃는 보정 용액에 대응되는 센서의

출력 전압을 나타낸다. 또한 a₁ 과 a₂는 저농도 및 고농도에서의 구간 감도를 각각 나타낸다. 보정 과정에서는 이러한 보정 농도, 보정 전압 및 구간 감도를 저장하고 측정 과정에서는 피측정 용액에서의 출력 전압 V_x와 보정 값을 이용하여 피측정 용액의 산소 농도 S_x 계산한다.

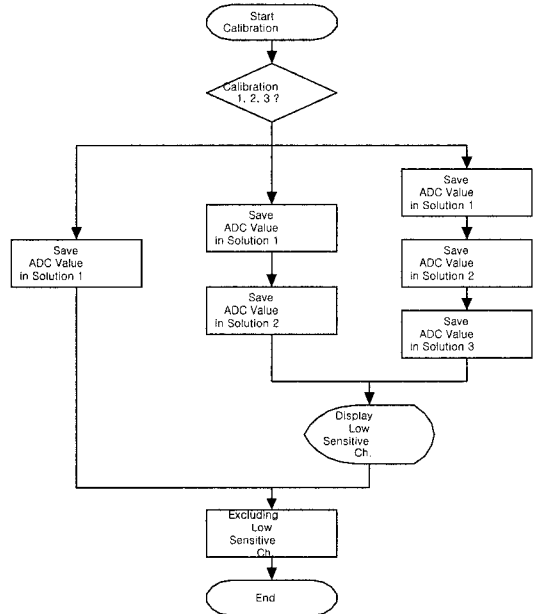


그림 7. 보정 과정
Fig. 7. Calibration routine.

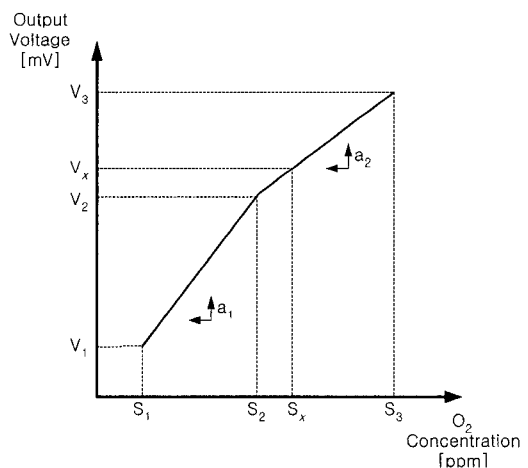


그림 8. 3점 보정 곡선
Fig. 8. Calibration curve for 3-point calibration.

2-2-4. 측정 과정

그림9은 측정 과정의 흐름도이다. 프로그램이

시작되면 앞의 보정 과정에서 정상 감도를 나타내는 채널로 판단되는 센서 출력 값의 산술 평균을 구하여 이것을 산소의 농도로 환산하여 LCD로 표시하게 된다. 산소의 농도를 한번 표시한 후 다시 각 채널의 센서 신호를 읽어 0V 또는 4.096V를 나타내는 채널이 있는지 확인한 후 그러한 채널이 있을 경우 측정 과정에서 제외시키고 나머지 채널의 센서 신호를 산술 평균하여 다시 LCD로 표시하는 과정을 반복한다. 그러나 가장 상황이 좋지 않은 경우 모든 채널의 센서가 측정에서 제외되면 더 이상 측정이 불가능하므로 측정을 중지하는 과정을 추가하였다. 일반적으로 FET형 센서가 측정 도중에 오동작을 일으키는 경우 바이어스 회로의 출력단 OP-AMP가 +15 V 또는 -15 V로 포화 되므로 A/D 변환기를 통해서 MPU가 읽어 들이는 값은 0V 또는 4.096V가 된다. 따라서 측정 과정에서 수시로 이러한 값들을 나타내는 채널이 있는지 판단해서 그러한 채널의 값을 제외시키면 더욱 신뢰성 있는 시스템을 구현할 수 있다.

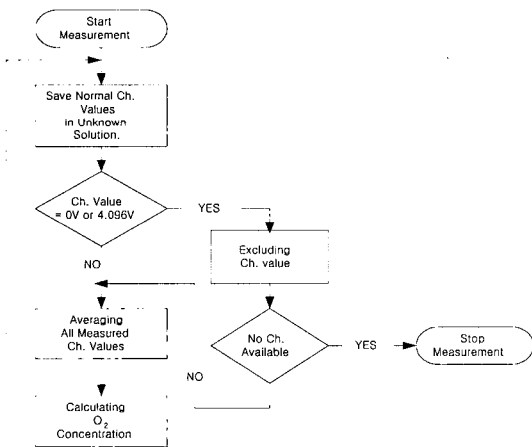


그림 9. 측정 과정
Fig. 9. Measurement routine.

III. 실험 및 결론

앞에서 제작된 FET형 어레이 용존 산소 측정 시스템의 외형을 그림10에 나타내었으며 성능을 평가하기 위하여 상용 용존 산소 미터와 비교 실험을 수행하고 그 결과를 표 1에 나타내었다. 먼저 모든 측정시스템은 3점 보정을 하였다. 또한 측정은 25 °C, 18 ml/min의 유속 및 10 mM PBS

의 실험 조건 하 에서 이루어졌다.

개발된 측정 시스템은 소프트웨어 적인 방법으로 오류 및 감도가 저하된 센서 채널을 전압 조정, 보정 및 측정 과정을 통해 제외시키고 나머지 채널의 평균값을 최종적인 용존 산소 농도로 환산하여 표시하는 알고리즘을 적용하여 측정의 신뢰도를 향상 시켰다.

개발된 측정 센서 시스템은 상용 용존 산소 미터와 비교시 최대 0.2 ppm의 오차를 보였으며 평균적으로 0.1 ppm의 양호한 오차를 나타내었다.

표 1. 용존산소 농도 측정
Table 1. Dissolved oxygen concentration measurement.

Commercial DO measurement system	FET-type array DO measurement system
3.0 ppm	2.8 ppm
5.0 ppm	4.8 ppm
7.0 ppm	6.9 ppm
8.0 ppm	8.1 ppm
10.0 ppm	10.0 ppm
12.0 ppm	12.1 ppm
13.0 ppm	13.1 ppm
17.0 ppm	17.2 ppm
19.0 ppm	19.1 ppm

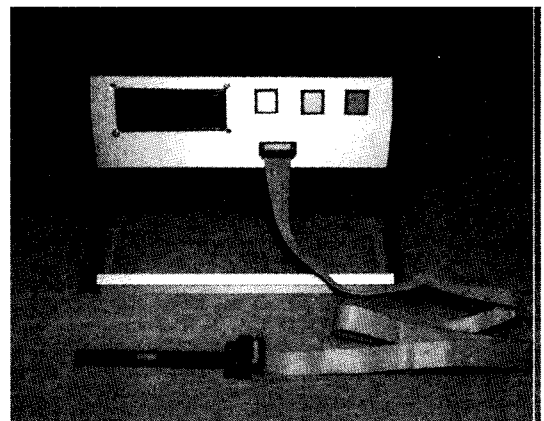


그림 10. 측정 시스템의 외형
Fig. 10. Outer view of measurement system.

참고 문헌

1. L. Clark, "Monitor and control of blood and tissue oxygen tension", Trans. American Society of Artificial Internal Organs, 2 pp.41-48, 1956.
2. Hiroaki Suzuki, Akio Sugama, and Naomi Kojima, "Miniature Clarktype oxygen electrode with a three-electrode configuration", Sensors and Actuators B, vol.2, pp.297-302, 1990.
3. J. F. Schench, "A transistor method for measuring changes in double layer potentials", J. Colloid and Interface Science, vol. 61, pp. 569-576, 1977.
4. R. Kalvoda and E. Horwood, "Operational amplifiers in chemical instrumentation", Halsted Press, 1975.
5. 정용원, "8051 기초+ α ", 성안당, 1999.
6. <http://www.analog.com/>
<http://www.national.com/>
7. Sedra and Smith "MICROELECTRONIC CIRCUITS", Saunders college Publishing, pp. 762-835, 1995

 著 者 紹 介

정 훈

1987년 서울 산업대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1990년 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1998년 경북대학교 대학원 센서공학과(박사수료)
 1990년-현재 한국통신기술(주) 데이터망사업팀 부장
 인천국제공항 통신 자동화 운영팀장
 주관심 분야 : FET형 용존 산소 센서, 센서 신호 처리, 센서 제조 및 공정

손 병 기

1960년 경북대학교 사범대학 물리학과 (이학사)
 1962년 동대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
 1967-1968년 미국 University of Arizona 대학원 물리학과 (박사과정)
 1981년 경북대학교 대학원 물리학과 (이학박사)
 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수, 경북대학교 센서기술연구소 소장
 주관심 분야 : 반도체 센서, 센서 제조 및 공정, 센서 신호 처리