

Polarographic 산소전극용 센서회로 설계에 대한 일 방안

이 동희*, 최복길**, 김남정***, 강문호***

*수원대학교 전기공학과, **공주대학교 전기공학과, ***고려대학교 전기공학과

A Method on the design of the Sensor Circuits for the polarographic Oxygen Probes

Rhie Dong-Hee*, Choi Bok-gil**, Kim, Nam-Jeong***, Kang, Mun-Ho***

*Dept. of Electrical Eng., Univ. of Suwon

**Dept. of Electrical Eng., Kongju Nat'l University

***Dept. of Electrical Eng., Korea University

ABSTRACT : Methods are described for the design and fabrication of the sensor circuits on the polarographic oxygen sensing electrodes. The discussion includes : a method for the +5V single-supply driving for the sensor circuits, a method of low power consumption for the front-end electronics. Typical polarograms for the commercial DO probes using this sensor circuits are presented. High accuracy of the I to V conversion using the circuits is verified.

1. 서론

Clark(1)에 의해 혈액 및 세포조직의 산화감시용으로 설계된 polarographic 산소전극은 현재 용액중의 용존산소분압(Dissolved Oxygen Tension:DOT) 측정용 통한 수질측정 및 연속공정감시용으로 환경공학에서 중요한 위치를 점하고 있을 뿐만 아니라 기상산소감시용, glucose analyzer 등의 용도로 미생물학, 의학, 화학, 화학공학, 토목공학, 생리학등 실로 광범위한 분야에서 다양하게 활용되고 있는(2) 화학량론식이다.

이 polarographic 산소전극은 Ag를 양극(A)으로 그리고 Pt나 Au를 음극(K)으로 하는 두 금속전극으로 구성되며, 특정 분극 전압 인가시 기준전극(A)과 측정전극(K) 간을 흐르는 전류를 검출하여 용존산소분압 즉 용존산소농도를 측정하는 전류측정형 센서이다.

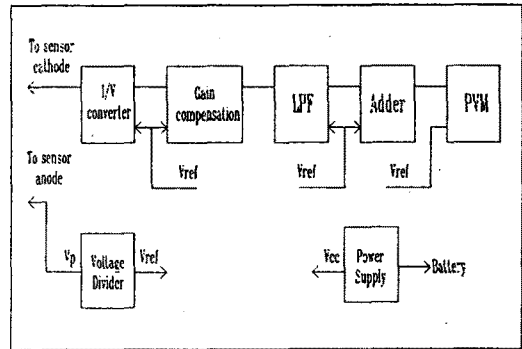
이 센서의 기본적인 화학반응은(3) 염소이온을 함유한 전해액에 전극반을 침적시킴으로써 촉진되며, 이때 양극과 음극간에 미소한 전류가 흐르게 된다. 따라서 이 센서의 기본적인 성능은 probe에 사용되는 전극재질이나 전해액 또는 용존산소가 부과하는 격막의 재질 및 특성에 의해 결정되나(4) 실용면에서는 센서 전극간을 흐르는 미소전류를 정확하게 검출할수 있는 미소전류 측정회로가 필수적이다.

일반적으로 미소전류를 측정하기 위해서는 고감도의 전압증폭기나 입력전압이 극히 낮은 전류-전압변환회로가 필요하나 본 고에서는 휴대형 DO 측정기 개발을 전제로 하여 +5V 단일전원으로 동작하는 polarographic 전극용 센서회로 설계에 대한 한가지 방안을 제시하고자 한다.

2. 센서회로 설계

휴대형 DO 측정기는 전지로 동작시키게 되므로 이를 가능한 장시간 사용하기 위해서는 기기의 소비전력이 작아야 하며 아울러 기기의 부피를 감소시키기 위해서는 전지 갯수를 줄일

것이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 단일전지에 의한 +5V 단일전원에서 전력소비를 최대한 억제시킬 수 있는 산소센서회로를 고안하였다. <그림 1>에 본 연구에서 고안한 단일전원 동작 DO 센서회로의 block도를 나타내었다.



<그림 1> 산소센서회로 Block도

본 센서회로는 크게 나누어 센서로부터 입력되는 전류신호를 검출 측정하는 회로와 이를 디지털표시하는 DVM 회로의 두 부분으로 구성되어 있으며 전 시스템에 바이어스전압을 인가하기 위하여 3단자 정전압 regulator MC7805를 이용하여 +9V 전지로 부터 +5V 출력을 얻을 수 있는 전압회로를 구성하였다.

한편 후술하는 바와 같이 센서회로를 단일전원으로 구동시키기 위해서는 기준전압(reference voltage: V_{ref})이 필요하며 또한 센서에 분극전위를 형성시키기 위해서는 분극전압(polarization voltage: V_p)이 필요하다. 이를 위해 미소전력 기준 다이오드 ICL8069를 이용한 기준전압 발생회로에 의해 센서회로용 기준 전압과 센서용 분극전압을 인가할 수 있도록 하였다.

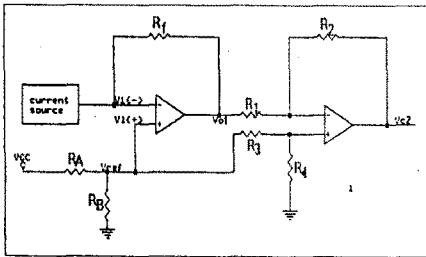
Polarographic 전극간에 흐르는 전류는 수 μA 정도로 미소하기 때문에 본 연구에서는 전류-전압변환회로를 이용하여 이를 측정하도록 하였다. <그림-2>에 본 센서회로의 전류-전압변환 회로부를 나타내었으며 여기서 OP-AMP와 기준전압 다이오드 LM385-2.5로 구성된 정전류원은 실험실에서 산소센서를 모의하기 위하여 사용하였다.

전류-전압변환회로는 전력이득을 가진 저항과 같이 동작하여 입력전류에 비례하는 전압을 출력하며 그 비례상수는 $V_0 = -I_i R_i$ 의 관계를 가지는 귀환저항 R_i 이다. 이 회로는 기본적으로 반전 증폭동작을 하므로 OP-AMP의 바이어스 전압이 양극성으로 공급되어야 한다. 이 경우 입력전류가 산소센서의 양극에서 음극을 통해 센서회로로 흘러 들어오므로 이 회로의 출력은 부극성

으로 된다. 따라서 본 회로를 +5V 단일전원으로 동작시키기 위해서는 OP-AMP의 비반전 입력단자에 임의의 기준전압 V_{ref} 를 인가하여 차동동작시켜야 한다.

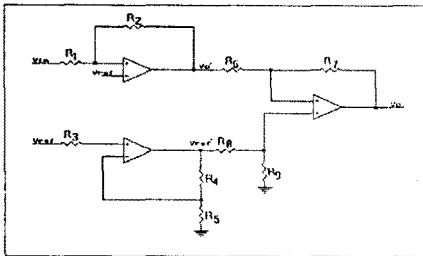
한편 이 회로는 OP-AMP의 입력단자에 흐르는 바이어스 전류가 오차를 유발시키므로 최대입력전류에 대해 1/100~1/1000 정도 이하의 정격을 갖는 OP-AMP를 선정할 필요가 있으며 예를 들어 입력바이어스 전류가 100pA인 경우 100 μ A의 full-scale 변환을 1% 정밀도에서 실행시킬 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 입력바이어스 전류가 1pA⁽⁶⁾ 극히 작은 CMOS dual OP-AMP TLC272를 사용하였다.

<그림-2>의 회로에서 U1은 기본적인 전류-전압변환회로로서 입력신호가 단일전원 동작을 위한 V_{ref} 에 중첩되어 출력되므로 U2의 감산기회로를 이용하여 순 입력신호만을 출력시킨다.



<그림-2> 전류-전압변환회로부

한편 <그림-1>의 block도에서 LPF(low-pass filter) 회로는 회로부분의 입수 용이성을 고려하여 시정수를 동일하게 하고 전압이득을 갖는 귀환증폭기로 구성하였으며, 따라서 이 전압이득을 보상하기 위하여 <그림-3>에 나타난 이득보상회로를 설계하여 LPF 회로에 의한 DC 에러를 제거하였다.



<그림-3> 이득보상회로

그림에서 U1은 LPF 회로에서의 전압이득을 보상하기 위한 신호감쇠회로이고 U2는 기준전압에 적절한 전압이득을 부여하기 위한 비반전증폭회로이다. U3는 감쇠된 신호전압만을 출력하여 LPF 회로로 전송시킨다. 이 회로의 응답은 다음과 같다. 즉 신호감쇠회로 U1의 출력 V_0 은

$$V_0 = A(V_{ref} - V_{in}) + V_{ref}$$

로 주어지고 여기서 $A = R_2/R_1$ (단 $R_1 > R_2$)로서 이 반전증폭회로의 전압이득 즉 감쇠율이다.

이 식을 변형하면

$$AV_{in} = (1+A)V_{ref} - V_0 = V_{ref} - V_0 = V_0$$

와 같이 되고 여기서 AV_{in} 은 전압이득을 갖는 LPF 회로로 입력될 신호전압 성분이다. 후술하는 LPF 회로에서의 전압이득이 2.57로 주어지므로 신호감쇠회로에서의 감쇠율은

$$A = 1/2.57 = 0.389$$

로 계산된다. 이에 따라 이득보상회로에서의 출력 V_0 은

$$V_0 = 1.389V_{ref} - V_0$$

로 정해지므로 U2의 비반전증폭회로에서 1.39배의 전압이득을

갖게 하였다.

한편 센서 및 서스팀에서의 고주파잡음을 제거하기 위하여 24dB/oct의 Butterworth특성을 가진 2차 LPF 회로를 구성하였으며 <그림-4>에 그 기본회로도를 나타내었다. 이회로의 특성은 다음과 같이 계산되나⁽⁶⁾ 여기서는 차단주파수를 10Hz로 설정하였다.

f_c	R1(R5)	R2(R6)	C1(C3)	C2(C4)	R3(R7)	R4(R8)
10 Hz	16k Ω	16k Ω	1 μ A	1 μ A	1.52k	10K Ω
10 Hz	16k Ω	16k Ω	1 μ A	1 μ A	12.35k	10K Ω

$$f_c = 1/2\pi R_1 C_2 = 1/(6.28)(16000)(1 \times 10^{-6}) = 9.95 \text{ Hz}$$

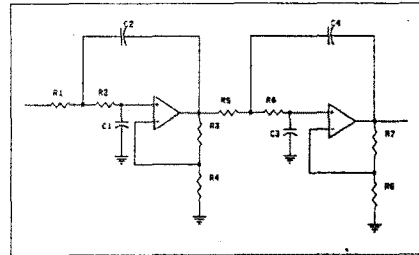
$$A_1 = 1 + R_3/R_4 = 1 + 1.52/10 = 1.152$$

$$A_2 = 1 + R_7/R_8 + 1 + 12.15/10 = 2.234$$

$$D_1 = 3 - A_1 = 3 - 1.152 = 1.848, \quad Q_1 = 1/D_1$$

$$D_2 = 3 - A_2 = 3 - 2.234 = 0.766, \quad Q_2 = 1/D_2$$

$$A_{LPF} = A_1 \times A_2 = 2.573$$



<그림-4> 동일시정수 Sallen-key Low-Pass Filter 기본회로도

후술하는 바와 같이 A/D 컨버터 ICL7107을 단일전원으로 동작시키기 위해서는 입력신호를 진원측으로부터 floating시킬 필요가 있으며 따라서 본 회로에서는 OP-AMP에 의한 비반전 가산회로를 이용하여 LPF 회로의 출력신호를 V_{ref} 에 중첩시켜 A/D 컨버터에 입력시켰다.

Polarographic 전극에서 입력되는 신호를 센서회로에 의해 직류전압으로 변환한 후 이를 디지털 표시하기 위하여 시중에서 입수가능한 LED 표시기와 LED 구동회로가 내장되어 있는 3-1/2 digit 7 segment LED 표시기 전용 A/D 컨버터 ICL7107을 이용하여 DVM 회로를 구성하였다. 본 센서회로의 기본 설계방안에 따라 DVM 회로도 +5V 단일전원으로 구동하도록 설계하였다. 이를 위해 ICL7107의 기본회로를 변경하여 센서회로의 기준전압 V_{ref} 를 컨버터 입력에 대한 기준으로 설정하고 입력신호를 1.5V 이내 범위로 제한하였으며, 또한 전압기준을 외부 회로에 부가하였다.

3. 센서회로 동작 평가

전체 시스템을 구성하기 전에 bread board상에 <그림-2>의 회로를 구성하여 본 연구에서 설계한 전류측정회로의 기본적인 동작을 시험하였다. 전류측정회로 시험에 앞서 정전류원 회로의 동작을 전압계법에 의해 먼저 확인하였다. 그 후 정전류원에서의 출력전류를 직결히 실감하여 20.2 μ A의 전류출력을 시험회로에 입력시켜 전압신호로 변환한 후 그 값을 상용 DVM으로 측정하여 회로 동작을 시험하였다. 이 결과를 <표-1>에 나타내었다.

여기서 전류-전압변환회로의 반전입력단 전압을 $V1(-)$, 비반

<표-1> 전류원에 의한 센서회로 시험 결과

RA kΩ	RB kΩ	VREF	V1 (+)	V1 (-)	VO1	Vref	VLPF
3.6	1.863	1.175	1.703	←	1.50	0.210	
5	1.567	1.163	1.157	←	0.954	0.208	
8.19	1.237	0.700	0.697	←	0.502	0.197	0.190
	1.318	0.705	0.745	←	0.544	0.204	0.198
	1.377	0.778	0.774	←	0.571	0.204	0.198
	1.497	0.790	0.786	←	0.584	0.205	0.198
	1.512	0.799	0.794	←	0.592	0.205	0.198
	1.833	1.179	1.163	1.160	0.923	0.208	0.201
	1.196	1.204	1.194	←	0.990	0.208	0.201
	2.229	1.496	1.486	←	1.283	0.209	0.203

전압원 전압을 V1(+), 그리고 그 출력단 전압을 VO1으로 나타내고 있으며 감산기회로의 출력을 VO2로 표시하였다. 또한 기준전압 Vref는 R1, R2 분압저항으로 구성된 간이 기준전압 발생회로에서 인출하여 시험회로에 인가하였다.

이 결과로부터 Vref의 값이 0.770V에서 1.715V의 범위에서 변화함에 따라 시험회로의 출력전압 VO2는 0.197V에서 0.209V의 범위에 걸쳐 변화함을 알 수 있다. 여기서 귀환저항을 10kΩ으로 하였으므로 전술한 바와 같이 이 회로는 100μA를 1V full-scale로 변환시키게 되며, 따라서 이 실측결과로부터 입력전류류 99% 이상의 정확도로 전압변환할 수 있음을 확인하였다.

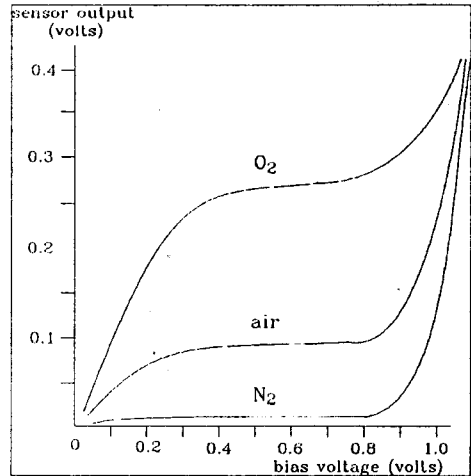
최종적인 산소센서회로는 이 기본회로를 이용하여 귀환저항 Rf를 각각 1MΩ, 100kΩ, 10kΩ으로 한 귀환분리를 구성하여 전류측1정범위를 변환시킬 수 있도록 하였다. 또한 각 귀환분리에는 미소전류변환시 잡음성분을 감시시키기 위하여 귀환컨덴서를 달아 주었다.

한편 <표-1>의 우단에 표시한 VLPF는 LPF 회로 출력단 전압을 나타내며 이로부터 Vref를 1.2V 정도로 한 경우 입력전류류 99.9% 이상의 정확도로 전압변환함을 알 수 있었다. 이에 따라 센서회로의 기준전압은 1.2V로 설정하였다.

전압신호로 변환한 신호전류류 디지털 표시하기 위한 DVM 회로의 동작은 우선 회로를 +5V 단일전원으로 구동시키면서 센서회로의 기준전압 Vref를 A/D 컨버터 ICL7107의 IN_{LO} 단자에 인가하여 입력신호를 전원측으로부터 floating시키 시험하였다. 입력신호는 먼저 직류전원장치로부터 1V 전압을 인가하여 시험한 결과 1V full-scale 범위에서 1000 표시가 주어짐을 확인한 후 전술한 바와 같이 전류원회로에 의한 동작을 시험하였다. 그 결과 센서회로의 LPF 출력단 전압이 정확하게 디지털 표시됨을 확인할 수 있었다.

실험실에서 전류원을 이용하여 센서회로를 모의실험한 후 최종적으로 polarographic 산소센서로부터의 입력신호를 측정하였다. 시험용 polarographic 산소센서로는 Au 음극, Ag 양극 구조의 polarographic 전극에 1 mil 두께의 FEP teflon을 산소투과성 격막으로 사용하고 전해액으로는 만분화 KCl 용액을 사용한 YSI사의 5739형 DO probe를 이용하였다.

실험은 시험용 용액을 bubbling 과정을 통해 공기(air)포화상태, 산소(O₂)포화상태, 질소(N₂)포화상태로 그 상태를 변화시키면서 본 센서회로의 지시치를 측정하였으며, 이로부터 polarographic 산소센서에 특유한 polarogram을 얻을 수 있었다. <그림-5>에 이를 나타내었으며, 이 그림에서 횡축은 polarographic 전극간에 인가하는 분극전압 V_b를 나타내고 종축은 본 센서회로에 의해 1V full-scale의 직류전압으로 변환된 센서 입력신호를 나타낸다. 여기에서는 각 상태에서의 상대적인 용존산소농도를 비교하기 위하여 귀환저항 10kΩ의 귀환분리기에 의해 측정된 값으로 표시하였다. 실측결과는 5739형 DO probe의 사양에서 주어지는 값과 잘 일치하였으며 이로부터 본 센서회로를 polarographic 전극에 적용할 수 있음을 확인하였다.



<그림-5> 시험용 산소전극에 의한 polarogram 특성

4. 결론

본 연구에서는 휴대형 DO 측정기를 개발하기 위한 방안으로 저소비전력형 CMOS dual OP-AMP TLC272를 이용하여 +5V 단일전원으로 구동되는 polarographic 전극용 센서회로를 설계하였으며 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제안된 polarographic 산소전극용 센서회로는 저소비전력형 OP-AMP를 기반으로 전체 회로를 설계하였으며 이에 의해 센서회로 자체에서의 전력소모를 극력 억제할 수 있으므로 휴대형 측정기에의 적용시 필수적인 조건인 장시간 사용 가능성을 강구하였다.

(2) 휴대형 측정기를 개발하고자 하는 경우 사용전지 갯수 및 이에 따른 기기 부피의 저감화를 도모하기 위하여 전 시스템을 단일극성 전압으로 구동할 수 있는 회로를 개발할 필요가 있다. 이를 위해 +5V 단일전원에서 동작하는 센서회로를 설계하여 그 동작을 확인함으로써 본 결과를 바로 산업화할 수 있는 가능성을 제시하였다.

(3)시중에서 입수가능한 부품에 의해 시험용회로를 개발해야 하는 제약조건으로 인하여 표시용 DVM 회로에 LED 표시기를 사용하였으나 산업화에 따른 양산성이 확보되면 DVM 회로를 저소비전력형 3-1/2 digit LCD를 사용하여 전 시스템의 저전력화를 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

이상의 결과로부터 polarographic 산소전극용 저소비전력형 센서회로 설계에 대한 방안을 제시하였으며 또한 본 연구를 통해 제안된 산소센서회로는 휴대형 DO 측정기 개발시 실제 적용 가능할 것으로 기대된다.

5.참고문헌

1. L.C. Clark Jr., "Monitor and control of blood and tissue oxygen tension", Trans.Am.Soc.Artif.Organs, 2, 41-48 (1956)
2. K.Tada, in "Sensor Technology", 113, Maruzen Pub (1991)
3. Y.H.Lee, G.T.Tsao, in "Advances in Biochemical Engineering", Vol.13, 35-86, Springer-Verlag,Berlin (1979)
4. C.D.Ferris, "Design and Fabrication of Polarographic Oxygen Sensor", J.Clinic.Eng., Vol.8, 201-211 (1983)
5. Linear Data book, (2-543)-(2-573), Texas Instruments Inc. (1987)
6. J.C. Boyce, in "Operational Amplifier and Integrated Circuits", 2nd ED., PWS-ICENT Pub., 203-212 (1988)
7. Linear Data book, (4-31)-(4-39), Intersil Inc (1987)