

수생태계 부영양화 분석을 위한 비색법 기반의 광학식 센서 신호처리회로(ROIC)구현

구성모¹ · 정동건¹ · 최영찬¹ · 김경규² · 공성호^{1,+}

Read-Out Integrated Circuit of Colorimetry-Based Optical Sensor for Eutrophication Analysis

Seong Mo Koo¹, Dong Geon Jung¹, Young Chan Choi¹, Kyung-Kyoo Kim², and Seong Ho Kong^{1,+}

Abstract

In this study, a read-out integrated circuit (ROIC) that can be applied to a colorimetry-based optical sensor for analyzing total phosphorus and total nitrogen was developed and characterized. The proposed ROIC minimizes the effect on temperature fluctuation, improves sensitivity, and extends the dynamic range by utilizing a dual optical path and feedback control circuit. Using a dual optical path makes it possible to calibrate the output signal of the optical sensor automatically, along with the temperature fluctuation. The calibrated voltage is fed back into the measurement stage; thus, the output current of the measurement is adaptively controlled. As a result, the sensitivity and dynamic range of the proposed ROIC are improved. Finally, a total-phosphorus analysis was conducted by utilizing the ROIC. The ROIC was found to operate stably over a wide temperature range.

Keywords: Colorimetry, Optical sensor, ROIC, Eutrophication, Feedback control, Temperature compensation, Auto calibration, Dynamic range, Silicon Photomultiplier

1. 서 론

4차 산업혁명 시대에 접어들면서 모든 사물, 인간, 건물 등에 센서를 설치 또는 부착하여 필요한 정보를 취득하고, 취득된 정보를 실시간으로 송/수신하게 되었다. 따라서, 고성능의 스마트 센서 개발에 대한 수요가 점점 높아지고 있으며 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 고성능의 스마트 센서 개발을 위해 많은 노력을 하고 있다. 스마트 센서는, 단순히 물리/화학적 신호를 감지하는 재래식 센서와는 달리, 감지된 신호를 분석 및 판단하고 이를 신속하게 전송하는 기능까지 통합되어 있는 것이 일반적이다.

일반적으로 흔히 사용되는 비광학식 센서는 감지 대상물질과 직/간접적으로 반응하는 물질의 특성 변화를 통해 물리/화학적

신호의 변화를 감지하게 된다. 이러한 비광학식 센서는 감지 대상 물질과 반응하는 물질이 지속적으로 소모되기 때문에 수명이 비교적 짧으며 잦은 유지 및 보수비용이 발생할 뿐만 아니라 불필요한 물질 간섭 현상에 취약하여 선택도 (Selectivity)가 낮은 단점이 있다.

반면 광학식 센서는 비광학식 센서에 비해 선택도 및 민감도 (Sensitivity)가 월등히 우수하며 광원 및 광디텍터(Photodetector)가 고장 나지 않는 이상 수명이 반영구적이어서 기존 비광학식 센서를 완벽히 대체할 수 있는 센서로 각광받고 있다. 고성능의 광학식 센서를 개발하기 위해 반도체 공정, MEMS (Micro Electro Mechanical System), 적외선 분광법(Infrared spectroscopy), 비색법(Colorimetric) 등의 다양한 첨단기술들이 활용되고 있다. 최근에는 센서 소자(Device) 자체의 성능을 개선할 뿐만 아니라 취득된 신호를 가공하는 신호처리회로(ROIC, Read-Out Integrated Circuit)의 개선을 통해 고성능 스마트 센서 개발을 가속화하기 위한 연구 또한 활발히 수행되고 있다.

본 논문에서는 광학식 센서의 측정방식 중, 가장 일반적인 방법 중 하나인 비색법 기반 광학식 센서를 수생태계의 부영양화 (Eutrophication)를 분석할 수 있는 총인(Total-Phosphorus) 및 총질소(Total-Nitrogen) 분석법에 적합하게 적용할 수 있는 신호처리회로를 구현하였다 [1-13]. 제안한 신호처리회로에서는 이중 광학통로(Dual Optical Path)를 적용하여 온도 변화에 따른 광학식 센서의 특성변화를 자동보정 하였으며, 그 출력을 측정단

¹경북대학교 IT대학 전자공학부(School of Electronics Engineering College of IT Engineering)
80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 41566, Korea
²경북대학교 HuStar ICT 혁신대학사업단(HuStar ICT Innovation University Agency)
244, IT-2(416) 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 41566, Korea
⁺Corresponding author: shkong@knu.ac.kr
(Received : Jul. 24, 2020, Revised : Jul. 27, 2020, Accepted : Jul. 30, 2020)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 피드백 제어(Feedback Control)하여 측정단의 전류를 제어함으로써 분해능을 높이고 동적영역(Dynamic Range)을 확장시켰다. 제안한 회로를 실험현하고 대표적인 비색법 기반 분석법 중 하나인 총인분석법에 적용하여 테스트한 결과 넓은 온도범위에서 안정적인(Stable) 특성이 보임을 확인하였다.

2. 연구 방법

2.1 제안한 신호처리회로 설계 및 제작

일반적으로 수질분석에 사용되는 비색법 기반 광학식 센서를 구동하기 위한 일반적인 신호처리 회로의 기본구조는 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 LED광원과 실리콘 광전자 배관(Silicon Photomultiplier, SiPM) 센서를 이용하여 LED광원의 입력전류에 따른 SiPM센서의 출력전압을 측정하고 측정된 전압을 전류로 변환하여 그 크기를 농도 측정에 이용한다. 일반적으로 SiPM의 전기적 특성은 온도변화에 민감하여 주변온도에 따라 전류변화가 크게 발생한다. 또한 LED에 공급되는 입력전류의 크기에 따라 SiPM 센서가 감지할 수 있는 동적영역 및 분해능이 차이가 나는 단점이 있어 단순히 기본 회로만 구성하여 사용하기에는 문제가 있다. 이를 개선하기 위해서 제안한 신호처리회로

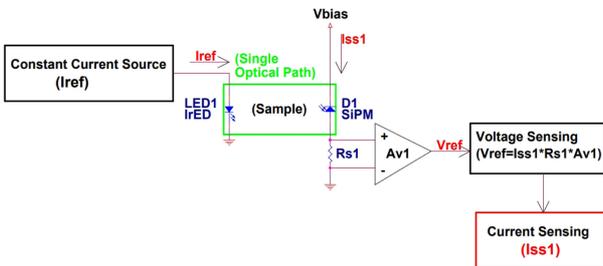


Fig 1. Schematic diagram of conventional ROIC for operating optical sensor

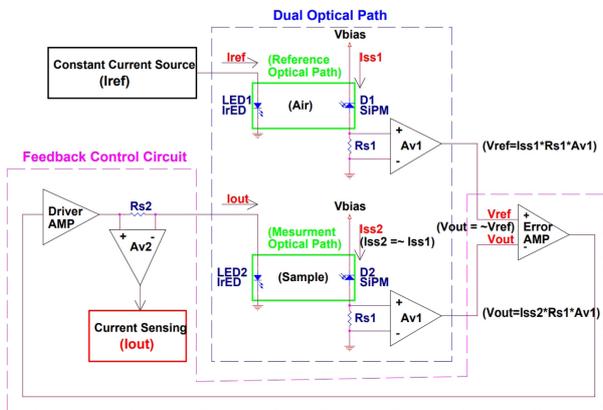


Fig. 2. Schematic diagram of proposed ROIC for auto-calibrated temperature, improved sensitivity and extended dynamic range

는 그림 2와 같다. 제안한 회로의 기본구조는 그림에서와 같이 5개의 증폭기와 2개의 LED-SiPM 쌍으로 구성하였다.

제안한 회로에서는 온도변화에 따른 SiPM의 바이어스 전류 변화를 자동보정하기 위하여 이중광학통로와 피드백제어회로를 적용하였다. 이는 공기매질을 기준입력으로 하는 기준단 광학통로(Reference Optical Path) 회로와 시료의 농도를 측정하는 측정단 광학통로(Measurement Optical Path)회로로 구성되며, 이 두 회로의 출력을 에러증폭기(Error AMP) 입력 양단에 연결하여 두 전압의 차를 온도보상에 사용한다. 이 에러증폭기의 차동 신호는 드라이버증폭기(Driver AMP)에 의해 LED에 공급할 전류로 변환되고, LED에 공급되는 전류에 비례하는 빛의 세기로 SiPM에 조사된다. 두 SiPM의 전기적 특성 및 광경로가 일치하고, 측정단이 기준단과 동일한 공기매질이면 측정단의 LED에 공급되는 전류는 기준단의 LED에 공급하는 전류와 동일하게 되고 결과적으로 각 SiPM에 흐르는 바이어스 전류 또한 동일하게 나타난다($I_{ss1} = I_{ss2}$). 이 바이어스 전류는 센싱저항(R_{s1})과 차동증폭기(A_{v1})에 의해 전압으로 출력되어 에러증폭기에 인가된다. 에러증폭기는 기준단의 전압 (V_{ref})과 측정단의 전압 (V_{out})을 비교하여 두 전압이 같아지도록 피드백하고, 드라이버증폭기를 통하여 측정단의 LED에 공급되는 전류를 제어한다. 그 결과 온도 변화에 상관없이 측정단의 LED전류(I_{out})는 기준단의 LED 전류(I_{ref})와 동일하게 유지되어 자동보정된다.

측정단에 시료가 공급되면 농도에 의해 측정단 광학통로의 흡광도가 증가하여 측정단의 SiPM에 조사되는 빛의 세기가 약해진다. 이는 SiPM에 흐르는 바이어스 전류를 감소시켜 센싱저항

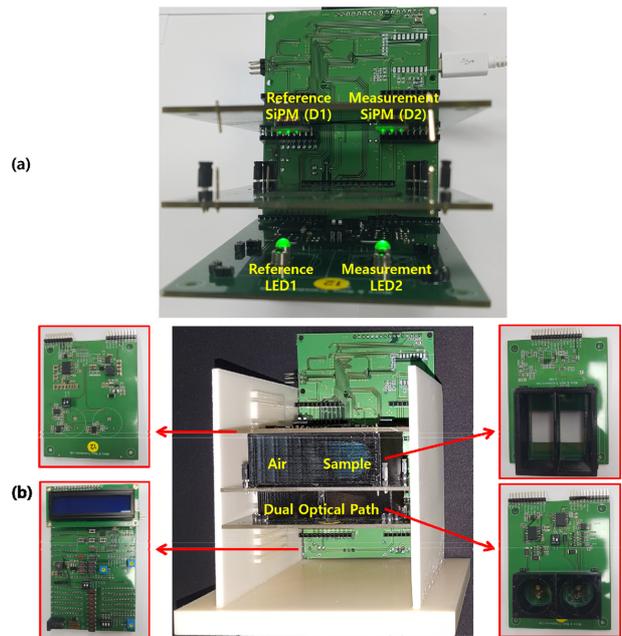


Fig. 3. Fabricated ROIC with dual optical path and feedback control ; (a) Fabricated ROIC on printed circuit board (PCB), (b) Experimental set-up for characterizing the proposed ROIC

과 차동증폭기에 의해 전압으로 변환되어 에러증폭기에 인가된다. 전압증폭도가 매우 큰 에러증폭기는 기준단의 전압(V_{ref})과 측정단의 전압(V_{out})의 차이를 증폭하여 드라이버증폭기를 통하여 측정단의 LED 구동 전류를 증가시킨다. 이는 측정단의 SiPM 바이어스 전류를 증가시키고 에러증폭기의 입력단에 인가된다. 이 전압(V_{out})과 기준단의 전압(V_{ref})의 차이를 증폭하여 두 전압이 같아지도록 피드백 제어한다. 결과적으로는 두 SiPM에 흐르는 바이어스 전류가 항상 같아지도록 측정단의 LED 전류를 제어하게 되고 이 전류값으로 시료의 농도를 읽어낸다. 이 때 측정단의 전류(I_{out})값은 특정 농도에 대해서는 주변온도변화에 상관없이 항상 동일한 값을 유지하게 된다. 한편 기준단의 LED 전류(I_{ref})를 SiPM이 감지할 수 있는 최소값으로 정하면 높은 분해능을 가지며, 측정단의 전류값은 시료의 농도에 따라 LED의 최대 구동 전류영역까지 사용함으로써 일반적인 신호처리 회로(그림 1) 대비 동적영역이 확대되는 효과를 가진다. 즉 일반적인 신호처리 회로에서는 LED의 입력전류(I_{ref})를 고정하고 시료의 농도(흡광도)에 따라 SiPM의 출력전류(I_{SS1})를 측정하여 농도의 변화를 구하는 반면 제안한 회로에서는 기준단의 LED 입력전류(I_{ref})를 고정하고 측정단의 SiPM 바이어스 전류(I_{SS2})를 기준단의 SiPM의 바이어스 전류(I_{SS1})와 일치하도록 피드백 제어하여 시료의 농도(흡광도)에 따른 측정단의 LED 출력전류(I_{out})의 변화 값을 측정하여 농도를 구하였다.

제안한 회로의 성능을 평가하기 위하여 그림 3과 같이 실험을 하였다. 이때 측정에 사용한 LED는 ODTECH사의 OL87KLB를 사용하였으며, 차동증폭기는 Analog Device사의 AD620, 드라이버증폭기는 On Semiconductor사의 NCS2372, SiPM은 On Semiconductor사의 MICRORB-SMPTA-10035-GEV를 사용하였다.

2.2 시료 준비

비색법 기반 광학식 센서의 성능 개선을 위해 제안된 신호처리 회로를 평가하기 위해 총인 분석법을 활용하였다. 총인 분석법은 수생태계의 부영양화 정도를 나타내는 지표로서 수생태계에 포함된 인의 총량을 의미한다. 인은 수생태계에서 다양한 물질들과 결합하여 화합물(Compound) 형태로 존재하며 측정을 위해서는 전처리 과정을 통해 인산염 인(Phosphate, PO_4^{3-}) 형태로

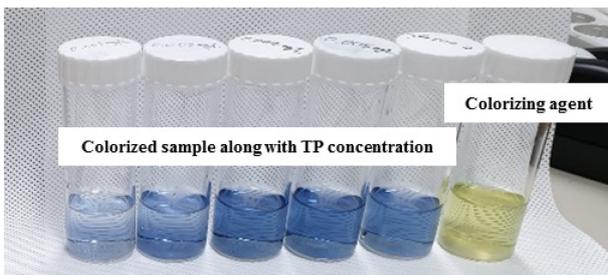


Fig. 4. Colored blue sample along with TP concentration and colorizing agent

분해되어야 한다. 전처리 과정을 통해 분해된 인산염 인은 발색제(몰리브덴-아스코르빈산 혼합액)에 의해 파란색으로 발색되며 발색된 시료의 흡광도를 측정하는 비색법을 활용하여 시료 속에 포함된 총인의 농도를 정량적으로 측정하게 된다.

총인 분석을 위해 필요한 시약의 제조방법은 다음과 같다.

- 과황산칼륨 용액 (4 W/V %): 과황산칼륨 (Potassium Persulfate, $K_2S_2O_8$) 4 g을 100 mL 물에 녹인다.
- 몰리브덴산 암모늄-아스코르빈산 혼합액: 몰리브덴산 암모늄 (Ammonium Molybdate(VI), $(NH_4)Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) 6 g과 주석산 안티몬칼륨 0.24 g을 물 300 mL에 녹이고 황산 120 mL와 슬퍼민산암모늄 5 g을 넣어 녹인 다음 물을 보충하여 500 mL를 만들고 여기에 7.2% L-아스코르빈산(Ascorbic Acid: $C_6H_8O_6$) 용액 100 mL를 넣어 섞는다. 반드시 사용 직전에 제조한다.
- 인산염인 표준원액 (1000 mg PO_4 -P/L): 미리 105 °C에서 건조한 인산 이수소 칼륨 (Potassium Phosphate, Monobasic; KH_2PO_4 ; 표준시약) 0.439 g을 정밀히 달아 물에 녹여 정확히 1000 mL를 만든다.
- 인산염인 표준용액 (100 mg PO_4 -P/L)을 100배 희석한 후 몰리브덴산암모늄아스코르빈산 혼합액 0.8 mL를 넣어 흔들어서 섞은 후 20~40 °C에서 15분간 방치한다.

위 절차에 따라 제조된 시료의 총인 농도에 따라 파란색으로 발색된 시약을 활용하여 본 논문에서 제안한 신호처리회로의 성능을 검증하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

제안한 신호처리회로의 성능을 평가하기 위해, 온습도 시험기는 경상북도 영천시에 소재한 항공전자시험평가센터의 H1500(KOLAS)와 대구광역시 달서구에 위치한 나노융합실용화센터의 SH-100모델(삼흥기계공사)을 사용하였다.

먼저 측정단의 시료농도를 기준단의 농도와 동일하도록 시료가 없는 공기매질에서 -10 ~ 50 °C 범위에서 온도를 5 °C씩 변화시켜가며 측정단의 LED 출력전류를 측정하였다. 측정에 사용한 기준단의 LED 입력전류는 1 mA로 설정하였으며 두 SiPM 역바이어스 전압은 30 V로 설정하였다.

온도 특성의 경우, 일반적인 신호처리 회로와 제안한 신호처리 회로를 동시에 온습도 시험기에 넣고 동일환경에서 평가하였다. LED의 입력전류(I_{ref})를 1 mA로 설정하고 SiPM의 출력전류(I_{SS1})와 측정단의 출력전류(I_{out})를 동시에 측정하였다. 측정된 온도 특성을 그림 5에 나타내었는데 온도 변화에 따른 출력전류(I_{SS1})의 변화가 일반적인 신호처리 회로의 경우 상온을 기준으로 약 $\pm 100\%$ 로 매우 높았던 반면, 제안한 신호처리 회로에서는 출력전류(I_{out})의 변화가 약 $\pm 20\%$ 로 크게 개선됨을 보였다. 실제 사용환경온도라고 볼 수 있는 10~40 °C 범위에서

는 출력 전류의 변화가 $\pm 8\%$ 로 다소 미미하였다. 이 오차는 두 SiPM의 특성과 광경로의 불일치로 인해 발생하는 것으로 판단되며 온도특성 실험결과가 이상적으로 출력되지 않은 점은 추후 보완해야 할 점으로 보이지만 전반적으로는 좋은 특성을 보였다.

다음으로 제안한 회로에서 기준단의 LED 입력전류 변화에 따른 측정단의 LED 출력전류 변화를 시료가 없는 공기매질에서 측정하였다. 측정을 위한 온도는 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하고, 두 SiPM의 역바이어스전압은 각각 30 V로 고정하였다. 기준단의 입력전류는 2 mA에서 20 mA까지 2 mA단위로 증가시키면서 측정하였다. 기준단의 LED 입력전류에 대한 측정단의 LED 출력전류 특성은 그림 6의 점선과 같이 전 영역에서 선형성을 유지하였다. 일반 신호처리 회로에서 LED의 입력전류의 변화에 따른 SiPM의 출력전류의 변화를 공기매질에서 측정하였다. 측정을 위한 온도는 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하고, SiPM의 역바이어스전압은 30 V로 고정하였다. LED의 입력전류는 2 mA에서 20 mA까지 2 mA 단위로 증가시키면서 측정하였다. 그림 6의 실선과 같이 LED의 입력전류가 증가(시료의 농도가 감소)하면 SiPM의 출력전류의 변화율이 감소하는데 이는 시료의 농도가 낮은 영역에서는 분해능이 낮아짐을 알 수 있다. 즉 측정 시료의 농도를 높은 영역으로 증대하기 위해서는 LED의 입력전류를 증가시켜야 하며 이는 낮은 농도에서 시료의 분해능을 감소시킨다.

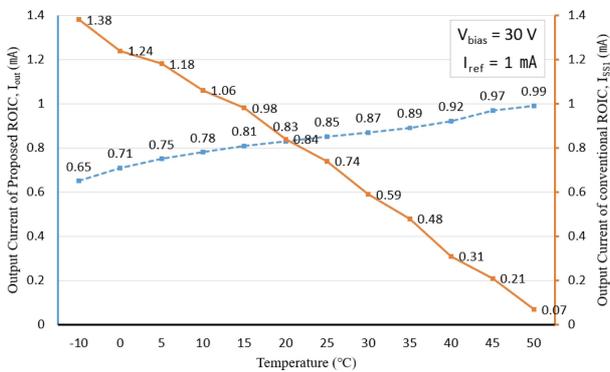


Fig. 5. Output currents as a function of temperature fluctuation measured by proposed and conventional ROICs

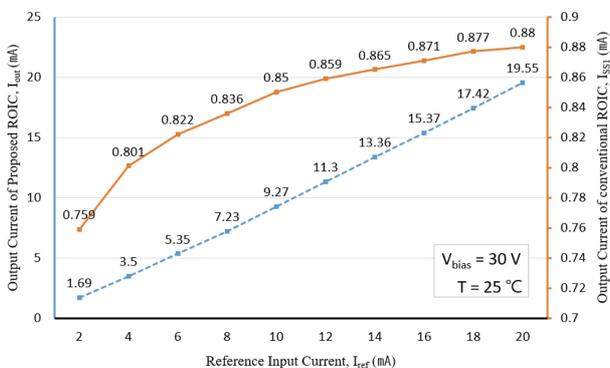


Fig. 6. Output currents as a function of reference input current measured by proposed and conventional ROICs

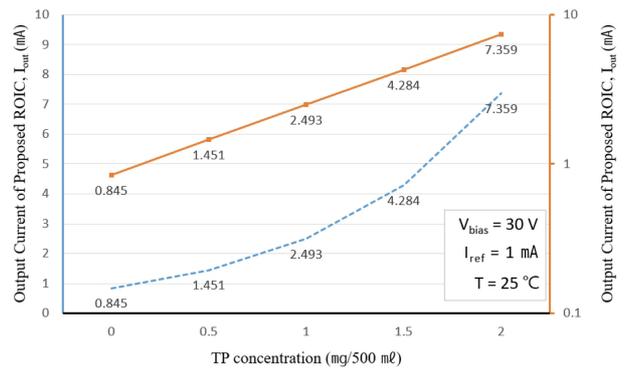


Fig. 7. Output current as a function of TP concentration measured by proposed ROIC

마지막으로 제안한 회로에서 측정단의 시료 농도 변화에 따른 측정단의 출력전류 테스트를 진행하였다. 측정을 위한 온도 및 두 SiPM의 역바이어스전압은 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 및 각각 30 V로 위와 동일하게 하고 기준단의 LED 입력전류는 1 mA로 설정하였다.

농도변화에 따른 출력전류 측정실험에서는 시료 농도 0~2 mg/500 ml 범위에 대해 0.845~7.359 mA의 출력변화를 보였는데, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 6에서 보인 바와 같이 제안한 회로에서의 입출력 특성(점선)이 일반 신호처리 회로(실선)와 달리 선형적인 특성을 잘 보이고 있으며, 이는 그림 7에 보인 총인 농도 변화에 따른 출력 특성이 Beer-Lambert의 법칙을 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

앞서 언급하였듯, 총인의 농도는 수생태계의 부영양화를 판단하는 기준으로 사용되고 있다. 환경부에서 고시한 부영양화의 기준은 상수원, 하폐수처리장, 방류수(공공폐수처리시설), 농업용수 등 적용되는 분야에 따라 조금씩 상이하다. 본 논문에서 제안된 광학식 수질센서는 공공폐수처리시설 방류수의 부영양화를 신속히 판단하기 위해 제안되었으며, 방류수에 포함된 총인의 농도가 1 mg/500 ml 이상일 경우, 부영양화가 일어날 수 있는 ‘위험’상태로 판단한다(공공폐수처리시설의 방류수 수질기준 제 26조 참조).

4. 결 론

4차 산업혁명 시대에 접어들면서, 고성능의 스마트 센서 개발에 대한 수요가 점점 높아지고 있다. 특히, 비광학식 센서에 비해 선택도 및 민감도가 우수하며 수명이 반영구적인 광학식 센서 개발에 대한 수요가 높아지고 있다. 고성능의 광학식 센서를 개발하기 위해서는 센서 소자 자체의 성능 개선도 중요하지만 취득된 신호를 가공하는 신호처리회로의 성능 개선도 필수적이다.

본 논문에서는, 비색법 기반의 광학식 센서 구동에 적합한 신호처리회로를 제안하였으며, 제안된 신호처리회로를 평가하기 위해 총인분석법을 활용하였다. 제안된 신호처리회로는 이중광

학통로 및 피드백 제어 회로가 적용되었다. 이중광학통로를 적용하여 온도변화에 따른 광학식 센서의 특성변화를 자동보정함과 동시에 피드백 제어 회로를 통해 측정단의 전류를 제어함으로써 분해능을 높이고 동적영역을 확장시켰다. 최종적으로 제안된 신호처리회로를 활용하여 0~2 mg/500 ml 농도 범위를 가지는 총인 시료를 분석하였으며 총인 시료의 농도 변화에 따라 전류가 로그 스케일(Log Scale)에서 선형적으로 출력됨을 확인하였다.

감사의 글

This work was supported by the Korea Innovation Foundation(INNOPOLIS) grant funded by the korea government (MIST) (2020-DD-UP-0348).

REFERENCES

- [1] S. R. Carpenter, "Eutrophication of aquatic ecosystems : Bistability and soil phosphorus", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 102, No. 29, pp. 10002-10005, 2005.
- [2] G. F. Lee, "The role of phosphorus in the eutrophication and diffuse source control" *Water Res.*, Vol. 7, No. 1-2, pp. 111-128, 1973.
- [3] D. W. Schindler, S. R. Carpenter, S. C. Chapra, R. E. Hecky, and D. M. Orihel, "Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 50, No. 17, pp. 8923-8929, 2016.
- [4] S. R. Carpenter, "Phosphorus control in critical to mitigating eutrophication", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 105, No. 32, pp. 11039-11040, 2008.
- [5] E. M. Bennett, S. R. Carpenter, and N. F. Caraco, "Human impact on erodible phosphorus and eutrophication: A global perspective", *BioScience*, Vol. 51, No. 3, pp. 227-234, 2001.
- [6] P. J. Dillon and F. H. Rigler, "The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 19, No. 5, pp. 767-773, 1974.
- [7] D. L. Correll, "The role of phosphorus in the eutrophication of receiving water : A Review", *J. Environ. Qual.*, Vol. 27, No. 2, pp. 261-266, 1998.
- [8] P. J. A. Withers, C. Neal, H. P. Jarvie, and D. G. Doody, "Agriculture and Eutrophication : Where Do We Go from Here?", *Sustainability*, Vol. 6, No. 9, pp. 5853-5875, 2014.
- [9] M. Oliveira and A. V. Machado, "The role of phosphorus on eutrophication : a historical review and future perspectives", *Environ. Technol. Rev.*, Vol. 2, No. 1, pp. 117-127, 2013.
- [10] R. Bol, G. Gruau, P.-E. Mellander, R. Dupas, M. Bechmann, E. Skarbovik, M. Bierzoza, F. Djodjic, M. Glendell, P. Jordan, B. V. D. Grift, M. Rode, E. Smolders, M. Verbeeck, S. Gu, E. Klumpp, I. Pohle, M. Fresne, and C. Gascuel-Oudou, "Challenges of reducing phosphorus based water eutrophication in the agricultural landscapes of northwest europe", *Front. Mar. Sci.*, Vol. 5, No. 276, pp. 1-16, 2018.
- [11] C. Ge, Y. Chai, H. Wang, and M. Kan, "Ocean acidification: One potential driver of phosphorus eutrophication", *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 115, No. 1, pp. 149-153, 2017.
- [12] C. Wang, L. Bai, H. L. Jiang, and H. Xu, "Algal bloom sedimentation induces variable control of lake eutrophication by phosphorus inactivating agents", *Sci. Total Environ.*, Vol. 557, No. 1, pp. 479-488, 2016.
- [13] M. L. Westendorf and C. A. Williams, "Effect of excess dietary phosphorus on fecal phosphorus excretion and water extractable phosphorus in horses", *J. Equine Vet. Sci.*, Vol. 35, No. 6, pp. 495-498, 2015.