


수질 측정용 플로우 셀의 오염 모니터링을 위한 평면광도파로 센서

한승헌, 김태언, 정행운, 기현철, 김두근, 김선훈 

한국광기술원 광학렌즈연구센터

PLC Optical Sensor for Contamination Monitoring on the Flow-Cell in the Water Quality Measurement System

Seung Heon Han, Tae Un Kim, Haeng Yun Jung, Hyun Chul Ki, Doo Gun Kim, and Seon Hoon Kim
 Optical Lens Research Center, Korea Photonics Technology Institute, Gwangju 61007, Korea

(Received August 14, 2019; Revised August 27, 2019; Accepted August 28, 2019)

Abstract: We have proposed a novel planar lightwave circuit (PLC) optical sensor to monitor the contamination in a flow-cell where water is continuously supplied through a water quality measurement system. We designed a PLC chip with a V-shape waveguide and the simulated its function as a sensor for monitoring contamination in a flow-cell using a numerical the FDTD (finite-difference time-domain) analysis. A novel cross type of waveguide was introduced to make the PLC chip of the V-shaped waveguide. The fabricated PLC was cut into the cross waveguide. A change in the optical propagation loss of the PLC sensor was observed after immersing the PLC sensor into city water. It was determined that the propagation loss of the PLC sensor was 3 dB at a wavelength of 1.55 μm in the city water for 15 days.

Keywords: Optical sensor, PLC, Contamination monitoring, Water quality measurement, Flow-cell, FDTD

1. 서론

물은 인간 삶의 질에 있어서 가장 기본적인 요소이며, 나아가서 환경문제와 연관된 경제문제와도 밀접한 연관성을 가지고 있다 [1,2]. 따라서 최근에는 음용수의 품질을 시험하고 호수, 강, 바다와 같은 환경 수자원의 오염을 모니터링하기 위한 다양한 측정 기술에 대한 관심이 증가하고 있다 [3-5]. 통상적으로 수질 측정은 매주 또는 매월 정기적으로 수집된 개별 샘플을 실험실 기반에서 정성 및 정량 분석하고 있어 실시간으로 수질 데이터를 제공하는 데 한계가 있다. 최근

수질 센서 시장의 주요 추세는 현장 모니터링을 위한 신뢰할 수 있는 온라인 휴대용 센서, 시약이 필요 없는 센서 및 실시간 데이터 전송이 가능한 센서를 필요로 한다 [1,3,5]. 수질 측정 및 모니터링을 위한 센서 기술은 전기 화학, 광학, MEMS, 나노 기술 등을 기반으로 하며, 그중 광학 센서는 사용 용이성, 유지보수 비용 절감 및 빠른 측정 속도 등의 장점이 있다 [6-11]. 실제적으로 분광학 기술은 UV-Vis-NIR 분광계로 화학 및 생물학적 변수를 측정할 수 있는 현장 및 실시간 수질 측정 시스템에 널리 사용된다 [12,13].

광학 기반의 수질 측정 시스템은 광원부, 광검출부, 플로우 셀(flow-cell)을 포함한 샘플부로 구성되며, 플로우 셀은 현장 및 실시간 수질 측정을 위해 시료 샘플링 및 측정을 위한 중요한 부품 중 하나이다. 흡수, 형광 및 산란 스펙트럼을 얻기 위해 광원으로부터 나온 빛은 샘플부의 플로우 셀을 거쳐 광검출기로 광학

✉ Seon Hoon Kim; shkim@kopti.re.kr

신호가 전달되게 된다. 한편, 현장 및 실시간 수질 측정을 위해서는 연속적으로 물이 플로우 셀로 공급되어야 하고 장시간 사용에 따라 플로우셀 자체의 오염을 피하기는 어렵다. 이러한 플로우 셀의 오염은 측정 시스템의 정확성에 영향을 줄 수 있지만, 다양한 측정 환경 조건 때문에 세정 또는 교체 등의 유지보수 시기를 쉽게 결정하기 어렵다 [14].

따라서 본 연구에서는 광학 기반 수질 측정 시스템의 플로우 셀의 오염 정도를 모니터링할 수 있는 평면광도파로(planar light-wave circuit, PLC)를 이용한 광학 센서를 제안하였다. 이러한 PLC 광센서를 통해 현장 및 실시간 수질 측정 시스템의 플로우 셀 오염으로 인한 측정 오차를 보정할 수 있을 뿐만 아니라 플로우 셀 자체의 유지보수 시기를 결정하는 데 활용할 수 있다. PLC 센서는 실리카 재질을 기반으로 설계 및 제작하였다. FDTD (finite-difference time-domain) 방법을 이용하여 PLC 센서의 감지 영역 부분의 오염을 가정하여, 오염에 따른 광전송 특성 변화를 수치 해석 하였다. 또한 플로우 셀 재질인 유리 기판과 PLC 센서를 수돗물에 장시간 노출시켜, 오염으로 인한 유리 기판의 광 투과율 변화와 PLC 센서의 광전송 손실을 조사 및 비교하였다.

2. 실험 방법

2.1 평면광도파로 센서의 구조

PLC 센서는 그림 1에서 보는 바와 같이 PLC 칩과 2개의 광섬유 블록으로 구성된다. PLC 칩과 광섬유 블록은 3개의 광도파로가 존재하는데, 2개의 광도파로는 PLC 칩과 광섬유 블록을 패키징하기 위한 정렬용이고 나머지 1개의 광도파로는 센싱을 위한 광신호의 입출력에 사용된다. PLC 칩에서 V자형 광도파로의 모서리 부분이 감지 영역에 해당한다.

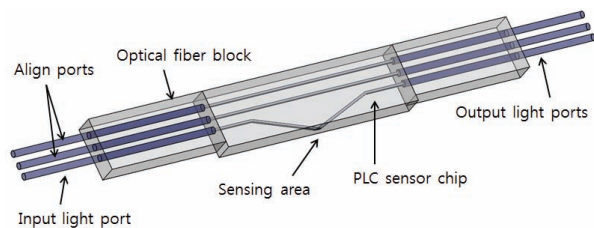


Fig. 1. Schematic diagram of the PLC sensor.

2.2 평면광도파로 센서 제작

PLC 칩은 실리카 박막 형성을 위한 화염가수분해 증착법(flame hydrolysis deposition, FHD)과 메사 구조의 도파로 형성을 위해 유도결합 플라즈마(inductive coupled plasma, ICP) 식각법을 포함하는 표준 PLC 제조 공정을 사용하였다 [15,16]. 그리고 PLC 제조에 대한 개략적인 흐름도를 그림 2에 제시하였다. PLC의 클래딩 및 코어 층의 두께는 각각 약 20 μm 와 6 μm 이며, 코어층과 클래딩층 사이의 굴절률 차이는 $\Delta n \sim 0.75\%$ 이다.

V자형 광도파로의 감지 영역을 형성하기 위하여, 먼저 4개의 직선 도파관과 1개의 교차 도파관을 포함하

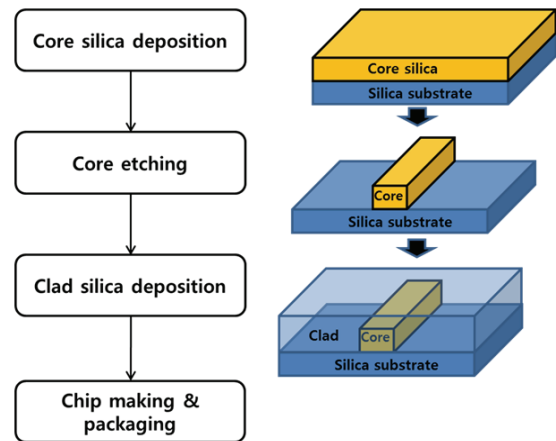


Fig. 2. Simple schematic flow chart of the fabrication steps for the PLC.

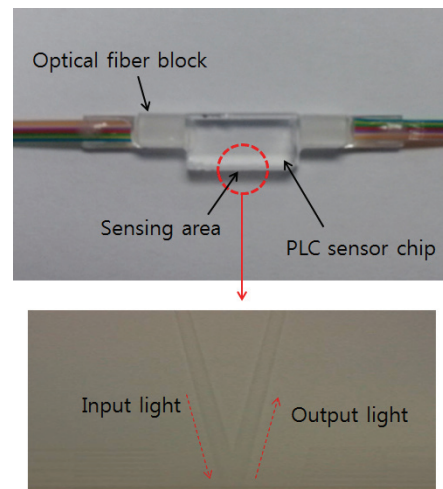


Fig. 3. V-shape PLC sensor packaged with fiber blocks.

는 PLC 칩을 설계 및 제작하였다. 앞서 제작된 PLC 칩의 직선 도파관과 평행한 방향으로 교차 도파관의 중심을 절단하여 V자형 도파로가 형성되도록 하였다. V자형 도파로의 입사각은 42° 가 되도록 하였으며, V자형 도파로의 모서리 부분을 연마하여 감지 영역을 제작하였다. 마지막으로, PLC 센서는 V자형 도파로를 포함한 PLC 칩과 광섬유를 포함한 광섬유 블록을 정렬 및 에폭시 본딩하고, 광신호가 입출력되는 광섬유는 광 패치 코드와 Pig-tailing 패키징하였다. 그림 3에 제작된 PLC 센서와 V자형 감지 영역의 사진을 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평면광도파로 센서의 FDTD 시뮬레이션

전술한 바와 같이, 제안한 PLC 센서가 수질 측정 시스템을 장시간 사용함에 따른 플로우 셀의 오염을 모니터링하기 위한 센서로서의 가능성을 확인하기 위하여 FDTD 방법을 이용하였다. PLC 센서의 V자형 감지 영역이 유기물질로 오염되었음을 가정하고 FDTD 방법을 이용하여 입출력되는 광신호의 변화를 수치 해석하였다.

그림 4는 PLC 센서의 감지 영역에 유기물질의 존재에 따른 광 모드 전파를 FDTD 방법으로 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4(a)는 감지 영역에 유기물질이 없는, 즉 오염되지 않은 상태의 경우이고, 그림 4(b)와

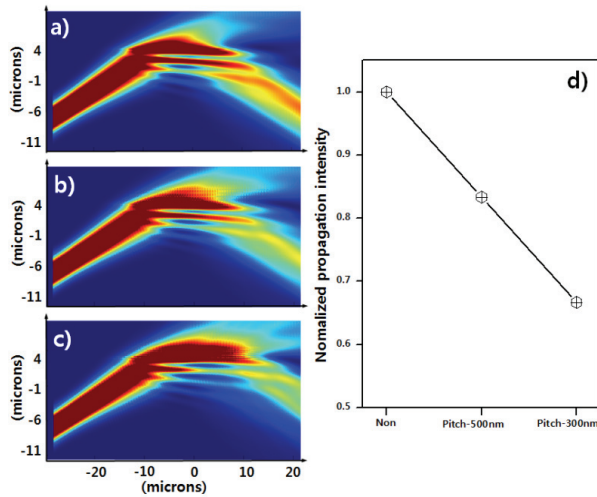


Fig. 4. Optical-mode propagations under the organic substance ($n=1.8$) using the FDTD method.

(c)는 유기물질($n=1.8$)이 50 nm의 두께로 각각 500 nm와 300 nm의 간격으로 존재하는, 즉 오염도가 증가하는 상태로 가정한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 4(d)에서 보는 바와 같이, 오염 정도가 증가함에 따라 광의 손실이 증가하여 전파되는 광의 강도가 감소됨을 FDTD 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

3.2 플로우셀 오염 모니터링

수질 측정 시스템에 사용하는 플로우 셀의 오염 모니터링을 확인하기 위하여, PLC 센서가 설치된 플로우 셀에 수돗물을 채우고 16일 동안 PLC 센서의 광전송 손실 변화를 관찰하였다. 그림 5는 PLC 센서에 광대역 광원을 입력한 후 1.3~1.65 μm 파장 대역에서의 광전송 강도를 측정된 결과로서, PLC 센서가 수돗물에 침지된 일수가 증가할수록 PLC 센서의 광전송 강도가 감소되었다.

그림 6은 PLC 센서의 광전송 측정된 결과에서, PLC 센서의 수돗물에 침지된 일수에 따른 1.55 μm 파장에서의 광전송 강도 측정값들을 도시한 그래프이다. 전술한 바와 같이 수돗물에 침지된 일수가 증가할수록 PLC 센서의 광전송 강도가 감소됨을 볼 수 있으며, 특히 광전송 강도가 3 dB만큼 감소한 침지 일수는 약 15일로 관찰되었다.

한편 수돗물을 플로우 셀에 채웠을 경우, 플로우 셀이 오염되는지와 PLC 센서의 측정 결과를 신뢰할 수 있는지를 확인하기 위하여, 슬라이드 글라스를 수돗물에 침지하여 오염 정도를 관찰하였다. 여기서 슬라이드 글라스는 플로우 셀과 PLC 센서의 재질과 같은 SiO_2

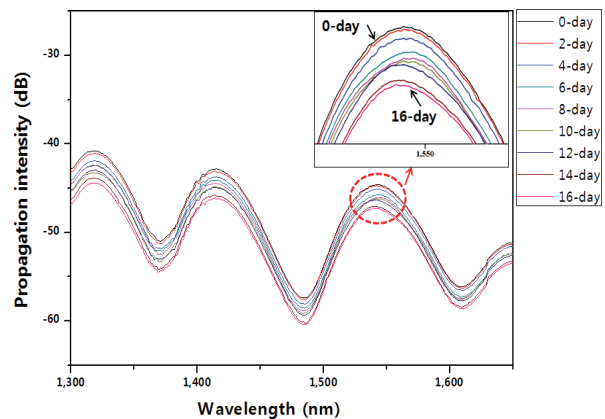


Fig. 5. Change of the optical propagation loss of the PLC sensor in the city water for 16 days.

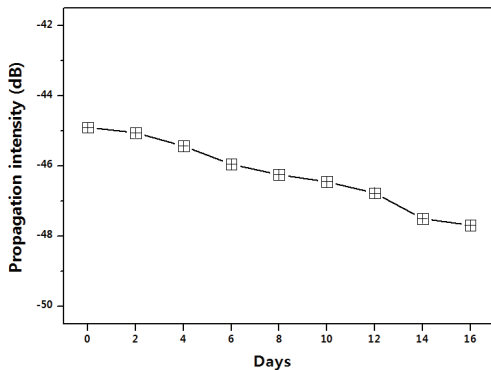


Fig. 6. Change of the optical propagation loss of the PLC sensor at the wavelength of 1,550 nm.

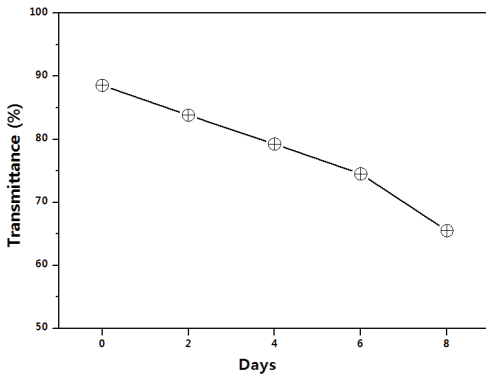


Fig. 7. Degradation of the transmittance of slide-glasses at the wavelength of 1,550 nm.

계열이므로 수돗물 침지에 따라 유사한 오염 정도를 보일 것으로 판단되어 선택하였다. 슬라이드 글라스의 장기간 수돗물 침지에 따른 오염도는 침지 일 수에 따른 슬라이드 글라스의 투과율 변화로 관찰하였다. 투과율 측정에 사용한 spectrophotometer 장비는 Varian사 Cary 500 Scan 모델이었다.

그림 7은 슬라이드 글라스의 수돗물 침지 일수에 따른 1.55 μm 파장 대역에서의 투과율 변화를 측정한 그래프이다. 슬라이드 글라스의 수돗물에 침지된 일수가 증가할수록 투과율이 감소함을 볼 수 있으며, 8일 동안 수돗물에 침지된 슬라이드 글라스의 1.55 μm 파장 대역에서의 투과율 감소량은 약 26%였다. 이는 수돗물에 침지된 PLC 센서의 광전송 강도 감소와 슬라이드 글라스의 투과율 감소가 동일한 경향을 보이는 것으로서, 이러한 결과를 통해 PLC 센서가 수질 측정 시스템의 플로우 셀 오염 정도를 모니터링하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

수질 측정 시스템의 플로우 셀의 오염 정도를 모니터링할 수 있는 새로운 형태의 PLC 센서를 제안하였다. PLC 센서는 V자형의 도파로를 포함한 PLC 칩과 광신호 입출력을 위한 광섬유를 포함한 광섬유 블록으로 구성된다. PLC 칩은 FHD 실리카 증착 및 ICP 에칭 공정을 포함하는 표준 PLC 제조 방법을 사용하였으며, PLC 센서의 감지 영역은 V자형 도파로의 모서리 부분을 연마하여 제작하였다.

먼저 FDTD 시뮬레이션 방법으로 제안된 PLC 센서 구조에서 감지 영역이 유기물질로 오염되었음을 가정하고 입출력되는 광신호의 변화를 수치 해석하여, PLC 센서가 플로우 셀의 오염을 모니터링하기 위한 센서로서의 가능성을 확인하였다. 실제 PLC 센서를 통해 플로우 셀의 오염 모니터링이 가능한지 확인하기 위하여, PLC 센서가 설치된 플로우 셀에 수돗물을 채우고 장기간 PLC 센서의 광전송 손실 변화를 관찰하였다. PLC 센서가 수돗물에 침지된 일수가 증가할수록 PLC 센서의 광전송 강도가 감소하였으며, 광전송 강도가 3 dB만큼 감소한 침지 일수는 약 15일이었다. 또한 플로우 셀의 장기간 수돗물 침지에 따라 오염 여부를 확인하기 위하여, 플로우 셀과 PLC 센서와 동일한 재질의 슬라이드 글라스를 역시 동일하게 장기간 수돗물에 침지하고 그 투과율 변화를 관찰하였다. 수돗물에 침지된 PLC 센서의 광전송 강도와 슬라이드 글라스의 투과율 변화가 동일한 경향으로 감소함을 확인하였다.

결론적으로 FDTD 시뮬레이션과 PLC 센서의 수돗물 침지 실험을 통해 제안한 PLC 센서가 플로우 셀의 오염 모니터링이 가능함을 확인하였으며, 나아가 제안한 PLC 센서를 이용하여 수질 측정 시스템의 유지 보수 및 오차 보정 등에 응용이 가능할 것으로 판단된다.

ORCID

Seon Hoon Kim

<https://orcid.org/0000-0003-3427-3157>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 광역협력관산업육성사업으로 수행된 연구 결과입니다(p0000851).

REFERENCES

- [1] H. B. Glasgow, J. M. Burkholder, R. E. Reed, A. J. Lewitus, and J. E. Kleinman, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **300**, 409 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.02.022>]
- [2] B. Pejčić, M. Myers, and A. Ross, *Sensors*, **9**, 6232 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s90806232>]
- [3] T. P. Lambrou, C. C. Anastasiou, C. G. Panayiotou, and M. M. Polycarpou, *IEEE Sens. J.*, **14**, 2765 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2316414>]
- [4] C. Moore, A. Barnard, P. Fietzek, M. R. Lewis, H. M. Sosik, S. White, and O. Zielinski, *Ocean Sci.*, **5**, 661 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.5194/os-5-661-2009>]
- [5] G. Tuna, O. Arkoc, and K. Gulez, *Int. J. Distrib. Sens.*, **9**, 249598 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/249598>]
- [6] C. M. Orrico, C. Moore, D. Romanko, A. Derr, A. H. Barnard, C. Janzen, N. Larson, D. Murphy, R. Johnson, and J. Bauman, *Proc. OCEANS 2007* (IEEE, Vancouver, Canada, 2007) p. 1. [DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449418>]
- [7] J. Bhardwaj, K. K. Gupta, and R. Gupta, *Proc. 2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)* (IEEE, Mumbai, India, 2015) p. 1. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTSD.2015.7095919>]
- [8] M. Vasiliev and K. Alameh, *Proc. 19th International Conference on Optical Fibre Sensors* (ECU Publications, Perth, Australia, 2008) 70045E. [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.786319>]
- [9] D. Ahuja and D. Parande, *J. Sci. Res. Rev.*, **1**, 60 (2012).
- [10] A. Dybko, *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, **56**, 173 (2008).
- [11] K. Fidanboyulu and H. S. Efendioglu, *Proc. 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS '09)* (Karabuk, Turkey, 2009) p. 1.
- [12] P. A. Vanrolleghem and D. S. Lee, *Water Sci. Technol.*, **47**, 1 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0074>]
- [13] W. S. Pegau, D. Gray, and J.R.V. Zaneveld, *Appl. Opt.*, **36**, 6035 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.36.006035>]
- [14] S. Yagur-Kroll, E. Schreuder, C. J. Ingham, R. Heideman, R. Rosen, and S. Belkin, *Biosens. Bioelectron.*, **64**, 625 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.09.076>]
- [15] L. Zhang, W. Xie, J. Wang, A. Li, H. Xing, W. Zheng, and Y. Zhang, *Appl. Surf. Sci.*, **228**, 48 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.12.022>]
- [16] M. Kohtoku, T. Kominato, Y. Nasu, and T. Shibata, *NTT Technical Review*, **3**, 37 (2005).