

## UV 임프린트 공정을 이용한 평면 광회로 기반 형광 산소 센서 프로브 모듈 제작

안기도 · 오승훈<sup>†</sup>  
전자부품연구원

### Fabrication of Fluorescent Oxygen Sensor Probe Module Based on Planner Lightwave Circuits using UV Imprint Lithography

Ki Do Ahn and Seung hun Oh<sup>†</sup>

Korea Electronics Technology Institute (KETI), 226 Chemdandwagi-ro, Buk-gu Gwangju 61011, Korea

(Received September 3, 2018: Corrected September 15, 2018: Accepted September 28, 2018)

**초 록:** 본 논문에서는 UV 임프린트 기반의 평면 광 회로층을 이용한 산소농도 검출용 집적형 형광 프로브 모듈을 제작하였다. 제안된 형광 프로브 모듈은 광원과 형광 신호를 고효율로 전송할 수 있게 동일 광 경로를 가지는 비대칭 1×2 빔 분배기 형태로 설계되었으며, 이를 UV 임프린트 공정을 통해 제작하였다. 제작된 광 회로층의 끝단에 최적의 형광 염료 농도로 센서막을 코팅하여 산소 농도 검출용 광학 프로브 모듈을 구현하였다. 제작된 형광 프로브 모듈을 이용한 산소 농도 측정용 센서 시스템은 0%에서 20%의 가스 농도 범위에서 약 0.3%의 분해능까지 산소 농도를 검출 할 수 있었다. 이러한, 평면 광회로 기반의 형광 프로브 모듈은 저가의 집적형 산소 센서 검출 시스템을 가능하게 하여, 화학분야, 바이오 분야, 그리고 대기 및 수질 환경을 모니터링 하는 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract:** This paper presents the integrated fluorescent oxygen sensor probe module based on planner lightwave circuits using UV imprint lithography. The oxygen sensor system is consisted of the optical source part, optical detector part and optical sensing probe part to be composed of the planner lightwave circuit and oxygen sensitive thin film layer. Firstly, we optimally designed the planner lightwave circuit with asymmetric 1×2 beam splitter using beam propagation method. Then, we fabricated the planner lightwave circuits using UV imprint lithography process. This planner lightwave circuits transmitted the optical power with 76% efficiency and the fluorescence signal with 70% efficiency. The oxygen sensitive thin film layer is coated on the end face of planner lightwave circuit. The oxygen sensor system using this sensor probe module with planner lightwave circuit could measure the concentration with 0.3% resolution from 0% to 20% gas range. This optical oxygen sensor probe module make it possible to compact, simple and cheap measurement system.

**Keywords:** Oxygen sensor probe module, UV imprint lithography, Fluorescence signal, Planner lightwave circuits

## 1. 서 론

거의 모든 살아있는 생명체는 호흡 및 에너지 생성을 위하여 산소를 이용한다. 따라서, 산소를 모니터링하는 것은 생물, 환경, 의학, 해양 등 다양한 분야에 적용되고 있는 매우 중요한 요소이다. 이러한 산소 농도를 측정하기 위한 방법들은 잉클러법, 전기분석법, 압력 기반에 의한 측정법, 형광 기반의 광학식 방법 등 다양한 방법들이 현재까지도 다양하게 연구되어 지고 있다.<sup>1)</sup>

전통적인 방법인 잉클러법은 실시간 산소 농도 측정이 불가능하며, 전기분석법에 의한 측정법은 다른 가스 등

에 의해서도 반응이 나타나므로 낮은 감도의 문제점을 지니고 있다. 이에 반해, 형광 기반의 산소 농도 측정 방법은 높은 검출 분해능을 가질 뿐만 아니라, 실시간 측정이 가능하고 광섬유 기반의 모니터링이 가능하여 화학,<sup>2)</sup> 의학,<sup>3)</sup> 그리고 대기 및 수질 환경을 모니터링 하는 분야<sup>4)</sup>에 적용되고 있다.

일반적인 형광 기반의 광학식 산소 센서는 LED 또는 LD에서 나온 여기광을 형광 센서막에 포커싱하여 조사하고, 센서막에서 산소 농도에 따라 방출되는 특정파장의 미세 형광 신호를 렌즈 등을 통해 광 검출기로 검출하여 산소 농도를 측정하는 형태로 이루어진다. 형광 기반

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: shoh@keti.re.kr

© 2018, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://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.

의 산소 센서는 주로 여기광에 의해 형광물질에서 나온 형광광을 극대화하기 위한 형광 센서막의 물질에 대한 특성연구들이 주로 이루어지고 있다.<sup>5,6)</sup>

형광 기반의 산소 광센서가 다양한 산업군에 적용되기 위해서는 집적화된 센서 소자 구조 및 외부 환경에 대한 높은 내구성이 요구된다. 하지만, 기존의 형광 기반의 광학식 산소 센서는 자유 공간에서 렌즈, 광원, 산소 형광 센서막, 광 검출기, 필터 등이 수동 광 정렬에 의해 조립되어 산소 농도를 검출하는 형태로 이루어진 프로브 모듈이 주로 사용되고 있다.

이러한 자유 공간상에서 광학부품의 조립에 의한 센서 프로브 모듈은 광원과 형광신호가 다른 광경로를 가짐으로 인해 검출 효율이 낮을 뿐만 아니라, 외부충격 및 진동 등의 요인에 의한 광정렬이 어긋남에 따른 센서의 신뢰성 문제점들이 대두되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 광원의 파워를 극대화하면서 전송함과 동시에 형광막에서 방출된 형광 신호를 고효율로 전송할 수 있는 동일 광 경로를 가지는 비대칭 구조의 1x2 빔 분배기 평면 광 회로층을 설계하고, 이를 임프린트 공정<sup>7,8)</sup>을 통해 제작하였다. 또한, 형광 염료 농도별 가스 농도에 따른 형광 차이를 분석하여 형광 세기의 차이가 가장 많이 발생하는 최적의 형광 염료 농도를 도출하였다. 도출된 최적 형광 염료 농도로 평면 광 회로층의 끝단에 형광 센서막을 코팅하여 산소 센서 검출용 광학 프로브 모듈을 구현하였다.

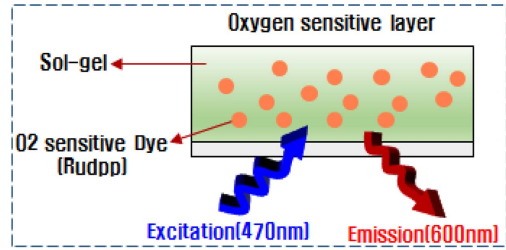
## 2. 평면 광 회로층 기반 산소 가스 센서 검출 원리

Fig. 1은 비대칭 구조의 1x2 빔 분배기 평면 광 회로층 기반의 고분자 산소 센서 프로브 모듈의 산소 검출 원리와 전체적인 구조도를 보여준다.

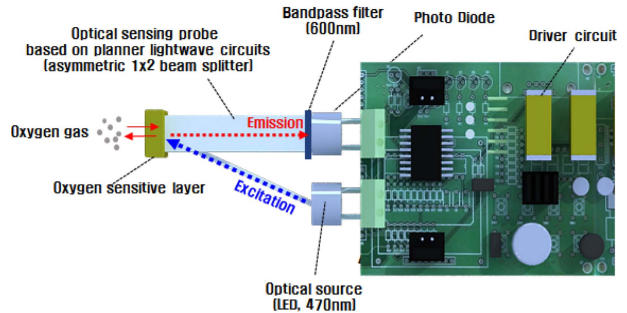
산소 가스 검출용 광센서 시스템은 광원부, 광 검출부, 센싱 형광막이 포함된 센서 프로브부, 가스 흐름셀, 구동 회로 및 신호처리부로 구성된다.

광원은 산소 농도를 측정하기 위한 에너지원으로 특정 파장의 광 신호를 발산한다. 센싱 형광막은 측정 환경에 존재하는 산소 성분과 반응하는 막으로서 광원으로부터 도달된 특정 파장의 여기광의 빛에너지를 흡수하여 들뜬 상태가 되고, 이때 흡수한 에너지를 일장파장의 빛 형태로 방출하는 형광특성을 나타낸다. 이때 형광특성은 측정 환경 내에 존재하는 산소 농도에 의존적인 특성을 나타내게 되며, 방출되는 형광 특성의 광 신호 에너지를 측정하여 산소 가스 농도를 측정하게 된다. 광 검출기부는 산소 성분과 반응하여 나온 형광 신호를 검출하며, 대역통과 필터에 의해 광원 신호와 중첩없이 형광 신호만을 검출하도록 구성된다.

센서 프로브 모듈은 광원의 파워를 극대화하면서 전송



(a) Oxygen detection mechanism



(b) Structure of oxygen sensor module

Fig. 1. Detection mechanism and structure of oxygen sensor with asymmetric 1x2 beam splitter planner lightwave circuits.

함과 동시에, 센싱 형광막에서 방출된 형광 신호를 고효율로 동시 전송하기 위한 구조로 이루어져야 한다. 이를 위하여, 본 논문에서는 비대칭 구조의 1x2 빔 분배기 구조로 평면 광회로층을 구성하였다. 산소 농도 측정용 센싱 형광막은 형광 염료 중 강한 형광을 발생시키며 양자 수율 및 형광지속시간이 긴 루테튬(II) 복합체(Rudpp)를 기반으로 한 형광염료 분자를 사용하였다. Rudpp는 470 nm의 빛에 의해 여기되어지고 600 nm의 형광을 방출하는데, 방출되는 형광의 세기는 Rudpp 주위의 산소분자 농도와 반비례하여 나타난다.

따라서, 산소 농도 측정용 광원으로는 루테튬(II) 복합체의 형광을 검출하기 위해 본 논문에서는 470 nm의 LED를 사용하였으며, 광 검출기는 OP-AMP가 내장된 실리콘 포토다이오드를 사용하였고, 광 검출기 전면에 600 nm의 대역통과필터를 패키징 되도록 설계하였다.

## 3. 1x2 비대칭 빔 분배기 평면 광 회로 기반 산소 센서 프로브 구조 설계

산소 센서 프로브용 평면 광 회로층은 Fig. 2(a)와 같이 채널 1과 채널 2의 선폭이 다른 형태로 분기되는 1x2 비대칭 구조의 빔 분배기로 설계하였다. 광원은 포트 1의 입력단으로 들어와서 형광센서막이 부착된 포트 2로 들어가며 센싱된 산소 검출용 형광 신호는 포트 3으로 연결되는 구조로 이루어진다.

광원이 들어가는 방향과 형광 센서막이 반응하여 센싱

Table 1. Design parameter.

Elements	Unit	Value
Wavelength	$\mu\text{m}$	0.470
Clad refractive index	-	1.506
Core refractive index	-	1.547
Width at Port 1	$\mu\text{m}$	200
Width at Port 2	$\mu\text{m}$	500
Waveguide Length	$\mu\text{m}$	30000

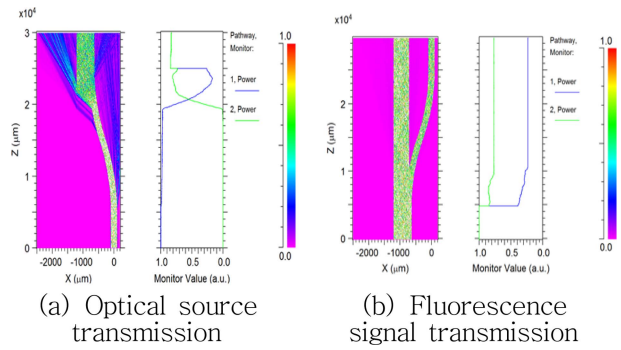
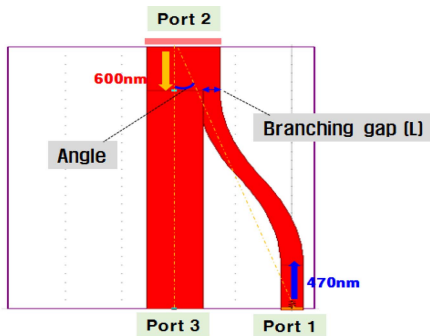
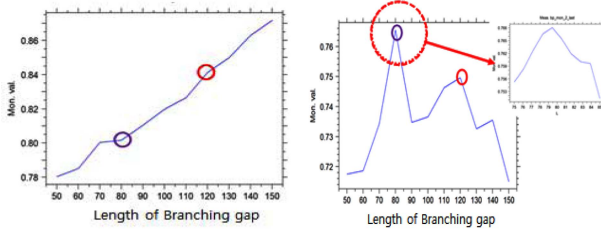


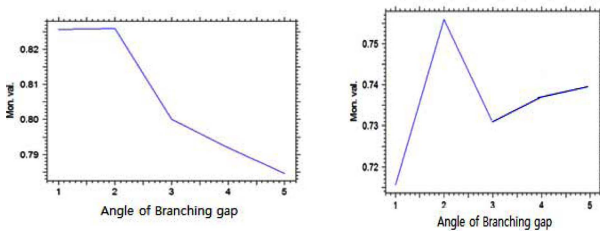
Fig. 3. Results of optical transmission efficiency in the optimized asymmetric 1x2 beam splitter structure.



(a) Structure of asymmetric 1x2 beam splitter



(b) Transmission efficiency according to branching gap



(c) Transmission efficiency according to branching angle.

Fig. 2. Design of planner lightwave circuit according to branching gap and angle.

된 형광 신호가 나오는 방향에서의 광전송 효율 관련하여 빔 전송 프로그램을 이용하여 평면 광 회로층의 최적 구조를 설계하였다.

산소 검출용 센서 프로브의 광 회로층의 설계를 위한 기본 설계요소는 Table 1에 나타내었다.

광원 및 형광 신호의 전송 효율은 Fig. 2(a)에서 나타난 광 회로층의 분기 간격 및 포트 1의 곡률과 관련된 각도에 따라 전송 효율이 달라지므로, 두 가지 변수를 최적화하여 평면 광 회로층을 최적 설계하였다.

Fig. 2(b), (c)은 분기 간격 및 각도변화에 따른 전송효

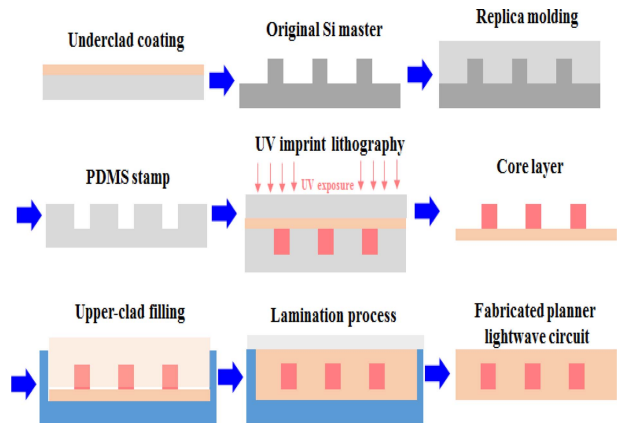


Fig. 4. Schematic view of fabrication process of polymeric planner lightwave circuit for oxygen sensor probe.

율 결과를 나타낸 결과를 나타내었다.

분기 간격 및 각도 변화에 따른 광전송 효율 변화를 통해서 이중도파로의 구조는 임프린트 공정 등을 고려하여 분기간격의 길이가 80  $\mu\text{m}$ , 각도는 2.1도로 최종 설계하였다. Fig. 4은 최적 구조에서의 광이 도파로 상에서 전송되는 이미지를 나타내었으며, 광원부에서 약 82%, 형광 신호 전송에서 약 76%의 효율을 가짐을 확인 할 수 있었다.

#### 4. UV 임프린트 공정에 의한 산소 센서용 평면 광 회로 제작

Fig. 4는 설계된 산소 센서 프로브용 1x2 비대칭 분배기 형태의 평면 광 회로층의 제작 공정도를 나타내었다. 평면 광 회로층은 하부 클래드 층 코팅, 실리콘 원형 금형 제작, 복제구조 방식에 의한 PDMS 스탬프 제작, 임프린트 공정에 의한 코어층 성형, 라미네이션(Lamination) 공정에 의한 상부 클래드 층 제작을 통해 이루어진다.

우선, 실리콘 원형 금형이 포토리소그래피 공정과 에칭 공정을 통해 1x2 비대칭 광 분배기 광 회로층 패턴이 제작되었다. 이후, 제작된 광 회로층의 실리콘 원형 금형을 이용하여 초음파 진동에너지가 접목된 복제구조방식에 의한 PDMS 스탬프를 Fig. 5(a)와 같이 제작하였다. 사용

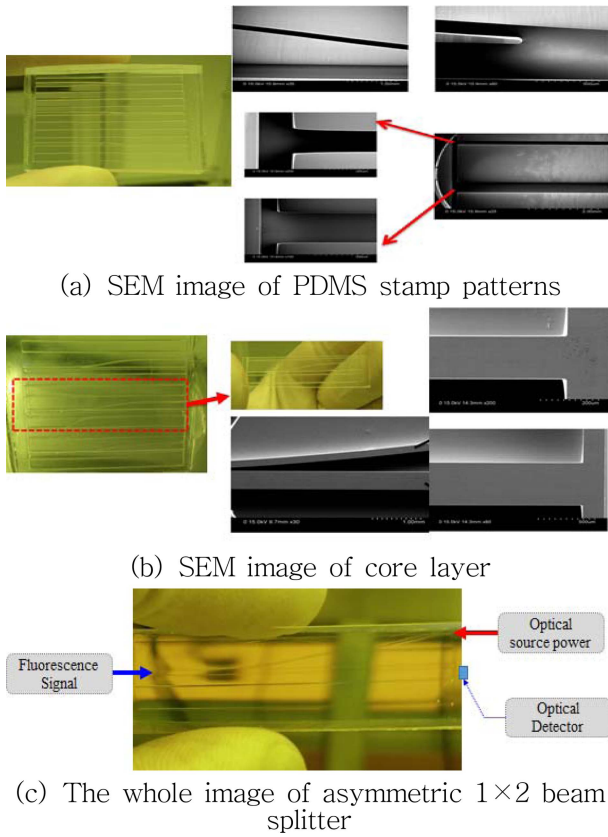


Fig. 5. The fabricated planner lightwave circuit.

된 PDMS용액은 Dow Corning사의 Sylgard™ 184를 사용하였으며, 전구체와 경화제가 무게비가 10:1의 일정 비율로 혼합시켜 충분한 안정화 시간을 거쳐 PDMS 용액을 안정화시켰고, 안정화된 PDMS 용액을 실리콘 원형 금형에 충분한 두께가 유지되도록 부은 다음, 70°C의 오븐에서 열경화시켜 UV 임프린트용 PDMS 스탬프를 제작하였다.

이후, 하부 클래드층이 코팅된 PMMA 시트와 음각의 광회로층 패턴을 가지는 PDMS 스탬프 사이에 코어 레진을 채워넣고, 0.8 bar의 균일한 압력을 가한 후, 질소분위기에서 사용된 코어 레진의 임계 노광량인 2500 mJ/cm<sup>2</sup> 만큼 UV를 15분간 조사하여 Fig. 5(b)와 같이 코어층을 정밀하게 제작하였다.

제작된 코어층 패턴의 선폭은 광원 전송을 위한 광도파로 선폭이 202 μm, 형광신호 전송을 위한 광도파로 선폭이 504 μm으로 설계대비 99% 이상의 정확도를 가지고 제작하였다. 이후 제작된 코어층에 라미네이션 공정을 통해 상부 클래드층을 형성하여 Fig. 5(c)와 같이 광 회로층을 제작하였다.

제작된 산소센서 프로브용 광 회로층의 특성 측정 및 광섬유와의 연결을 위하여 소자 끝단의 단면을 커팅하고 단면 연마 공정을 수행하였다. 제작된 광 회로층의 전송 손실을 측정하였으며, 광원부의 전송손실은 1.11dB, 형광 신호의 전송 손실은 1.58dB로 측정되었다.

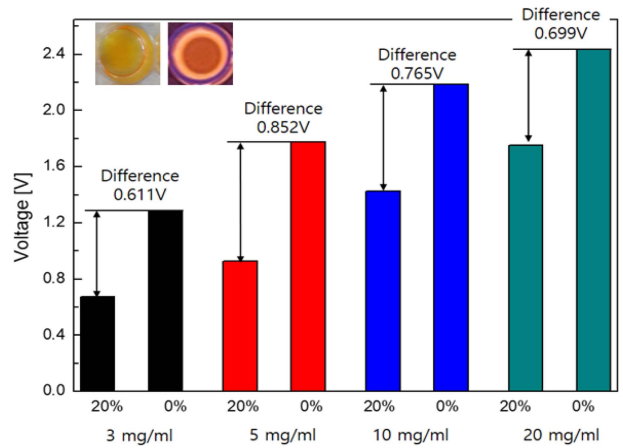


Fig. 6. Fluorescence intensity variation according to Ru(Dpp)<sub>3</sub><sup>2+</sup> concentration at 0% and 20% standard oxygen gas.

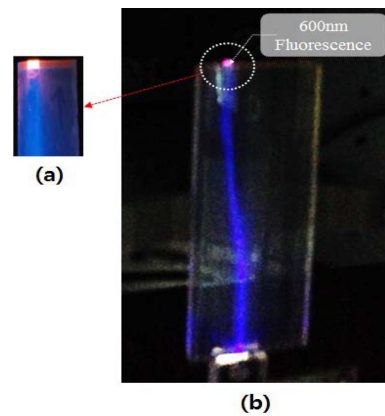


Fig. 7. Oxygen sensor probe module; (a) Image of coated fluorescence layer on the end face of planner lightwave circuit, (b) Beam propagation image and 600 nm fluorescence image.

### 5. 형광 센서막 코팅 및 산소 센서 모듈 패키징 공정

평면 광 회로층의 끝단에 산소 검출용 형광 센서막을 코팅하기 위한 산소 검출용 루테늄(II) 복합체(Rudpp) 기반의 형광 센서막을 제조하였다.

대기 중의 산소 농도 검출 분해능을 향상시키기 위한 최적의 농도를 도출하기 위해 농도별 형광 세기를 분석하였다. 이를 위해, MTMS : EtOH : H<sub>2</sub>O : HCl(35%)를 각각 3.97 mL : 1.84 mL : 0.72 mL : 18 μL의 조성비로 10 mL의 유리용기에 혼합한 후 3 시간 동안 교반하여 졸-겔 용액을 제조하였다. 그리고 졸-겔 용액에 4 μm의 직경의 실리카 입자에 흡착되어진 Ru(Dpp)<sub>3</sub><sup>2+</sup>를 각각 3 mg/ml, 5 mg/ml, 10 mg/ml, 20 mg/ml 농도별로 졸-겔 용액에 잘 혼합한 후 기판에 스프레이 코팅하였다. Fig. 6은 표준가스 0%와 20%의 표준가스에서 농도별 형광 세기를 나타낸 것으로, 일정 농도 이상에서는 형광 세기의 차이는 감



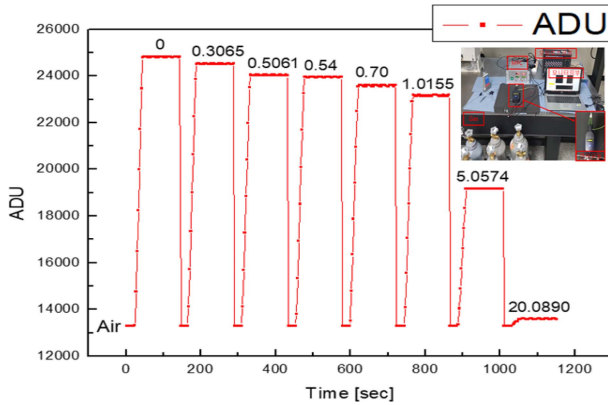


Fig. 8. Output signal variation according to gas concentration.

소함을 알 수가 있었다. 본 논문에서는 0%와 20%의 표준 산소 가스에서의 형광 세기가 가장 크게 나는 5 mg/ml의 농도 조건으로 형광 센서막을 제작하였다.

제조된 형광 센서막을 산소 센서 프로브용 광 회로층의 끝단인 500  $\mu\text{m}$  채널에 스프레이 코팅하였으며, 광원과 연결되는 200  $\mu\text{m}$  채널에 470 nm LED 광원과 연결된 200  $\mu\text{m}$ 의 광섬유를 에폭시를 이용하여 결합하였다. Fig. 7은 형광 센서막이 부착된 채널 이미지 및 470 nm 광원 입사시 600 nm 형광이 방출되는 이미지를 나타내었다.

## 6. 산소 센서 모듈 특성평가

제조된 광 회로층 기반의 산소 센서 프로브가 포함된 센서 모듈의 성능을 알아보기 위해 농도별 산소 표준 가스 및 질소 표준 가스를 순차적으로 주입하여 성능평가를 수행하였다. 표준가스들은 일정한 가스 유량 제어가 가능한 MFC를 통하여 가스 흐름셀에 주입하였다. 가스 농도에 따른 출력 신호는 기준 전압과 비교하여 차동 증폭기를 통하여 출력되어지며, 이 출력값은 16비트 A/D 변화되어 산소 농도를 나타낸다.

산소 검출용 프로브를 가스 흐름셀에 고정하고 0.3065, 0.5061, 0.54, 0.70, 1.0155, 5.0574, 20.0890%의 산소 표준 가스를 순차 주입하여 형광세기를 측정하였다. 특성평가 결과, 0.3%의 분해능 까지 산소 농도를 검출 할 수 있었으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 비대칭 구조의 1x2 빔 분배기 평면 광 회로층 기반의 산소 검출용 광학 센서 프로브 모듈을 제안하고, 이를 UV 임프린트 공정을 통해 제작하였다. 제작된 고분자 1x2 빔 분배기 평면 광회로층은 광원부의 전송 효율이 76%, 형광 신호 전송효율이 70%로 각각 측정되었다. 또한, 가스 농도별 형광세기 차이가 가장 많이 발생하는 형광 염료 농도 조건을 도출하여 제작된 광 회로

층의 끝단에 스프레이 코팅하여 산소 센서 검출용 광학 프로브 모듈을 구현하였다.

제안된 광 회로층 기반의 산소 검출용 센서 프로브 모듈은 기존의 형광 신호를 검출하기 위해 자유 공간상에서 광학 렌즈 및 부품들을 광정렬 후, 조립하여 이루어졌던 산소 센서 프로브 모듈을 평면 광회로층 하나를 가지고 집적화 시킬 수 있는 구조이다. 또한, 회로층 끝단에 형광 센서막이 집적적으로 부착되어 형광 신호를 효율적으로 검출할 수 있는 구조이며, 외부 충격 및 진동 등의 요인에 의한 광학 정렬의 어긋남에 의한 기존 센서 프로브 모듈의 신뢰성 문제를 해결 할 수 있을 것이다.

제작된 1x2 빔 분배기 평면 광회로층 기반의 산소 검출용 광학 센서 프로브 모듈은 0%에서 20%의 산소 농도 영역에서 0.3%의 분해능 까지 산소 농도를 검출 할 수 있었다.

이러한 산소 센서 모듈은 추후, 화학분야, 바이오 분야, 그리고 대기 및 수질 환경을 모니터링 하는 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

“본연구는 산업통상자원부 우수기술연구센터(ATC) 사업의 연구비 지원으로 수행된 연구 결과입니다.”

## References

1. X. D. Wang, and O. S. Wolfbeis, “Optical methods for sensing and imaging oxygen: materials, spectroscopies and applications”, *J. Chem. Soc. Rev.*, 43, 3666 (2014).
2. J. N. Demas, B. A. Degraff, and P. B. Coleman, “Oxygen sensors based on luminescence quenching”, *Anal. Chem.*, 71(23), 793 (1999).
3. K. Tsukada, S. Sakai, K. Hase, and H. Minamitani, “Development of catheter type optical oxygen sensor and applications to bioinstrumentation”, *Biosens. Bioelectron.*, 18(12), 1439 (2003).
4. E. VanderDonckt, B. Camerman, R. Herne, and R. Vandeloise, “Fiber-optic oxygen sensor based on luminescence quenching of a Pt(II) complex embedded in polymer matrices”, *Sens. Actuators B Chem.*, 32(3), 121 (1996).
5. P. Douglas, and K. Eaton, “Response characteristics of thin film oxygen sensors, Pt and Pd octaethylporphyrins in polymer films”, *Sens. Actuators B Chem.*, 82(2), 200 (2002).
6. C. McDonagh, B. D. MacCraith, and A. K. McCoy, “Tailoring of sol-gel films for optical sensing of oxygen in gas and aqueous phase”, *Anal. Chem.*, 70(1), 45 (1998).
7. T. H. Kim, S. H. Huh, and M. Y. Jeong, “Fabrication for Optical Layer and Packaging Technology of Optical PCB”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(1), 1 (2015).
8. S. H. Oh, M. Y. Jeong, H. G. Kim, and H. Y. Choi, “Fabrication of Monolithic Spectrometer Module Based on Planar Optical Waveguide Platform using UV Imprint Lithography”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(3), 1 (2015).