

# 이산화탄소 검출을 위한 고감도 비분산 적외선 가스센서의 광도파관 구조 설계

윤지영<sup>1</sup> · 이준엽<sup>1,2</sup> · 도남곤<sup>1,2</sup> · 정대웅<sup>1,+</sup>

## Optical waveguide structure design of Non-dispersive Infrared (NDIR) CO<sub>2</sub> gas sensor for high-sensitivity

Jiyoung Yoon<sup>1</sup>, Junyeop Lee<sup>1,2</sup>, Namgon Do<sup>1,2</sup>, and Daewoon Jung<sup>1,+</sup>

### Abstract

The Non-dispersive Infrared (NDIR) gas sensor has high selectivity, measurement reliability, and long lifespan. Thus, even though the NDIR gas sensor is expensive, it is still widely used for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) detection. In this study, to reduce the cost of the NDIR CO<sub>2</sub> gas sensor, we proposed the new optical waveguide structure design based on ready-made gas pipes that can improve the sensitivity by increasing the initial light intensity. The new optical waveguide design is a structure in which a part of the optical waveguide filter is inclined to increase the transmittance of the filter, and a parabolic mirror is installed at the rear end of the filter to focus the infrared rays passing through the filter to the detector. In order to examine the output characteristics of the new optical waveguide structure design, optical simulation was performed for two types of IR-source. As a result, the new optical waveguide structure can improve the sensitivity of the NDIR CO<sub>2</sub> gas sensor by making the infrared rays perpendicular to the filter, increasing the filter transmittance.

**Keywords :** Non-dispersive Infrared gas sensor, CO<sub>2</sub>, High-sensitivity, Optical waveguide structure design, Optical simulation.

### 1. 서 론

실내의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도는 일정한 수준을 넘어서면 불쾌감, 졸음, 구토 등을 유발하거나 장시간으로 노출될 경우는 건강에 치명적인 악영향을 끼칠 수 있기 때문에 적절한 환기가 필요하다 [1,2]. 그래서 가스센서를 이용하여 실내의 CO<sub>2</sub> 농도를 모니터링하는 것이 중요하다.

또한, 하천 및 호수 등의 수역에 생활 폐수, 공장 폐수로 인해 유기 화합물들이 유입되어 기존의 수중 생태계를 교란시키고 파괴함으로써 문제가 되고 있다. 이에 따라 유기 화합물을 간접적으로 측정할 수 있는 대표적인 항목으로 총 유기 탄소(total organic carbon, TOC)의 측정이 새롭게 부각하고 있다.

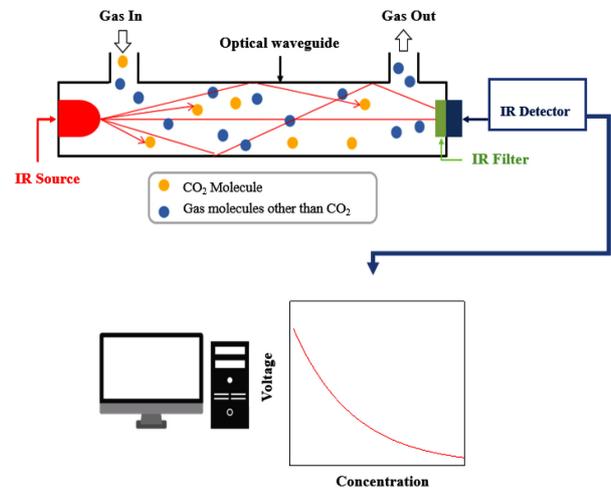


Fig. 1. Schematic of a typical NDIR gas sensor.

총 유기 탄소 측정은 유기화합물을 고온 연소 또는 고온 촉매연소로 CO<sub>2</sub>로 분해한 후, 가스센서를 통해 탄소 농도를 측정하여 유기 화합물의 농도로 환산한다. 이와 같이 CO<sub>2</sub> 검출용 가스센서는 실내공기질 및 수질 모니터링 등 광범위한 적용으로 산업계 및 학계에서 많은 관심을 받고 있다 [3,4].

현재 CO<sub>2</sub> 검출용으로 상용화된 가스센서는 반도체식, 전기화학식과 같은 접촉식과 비분산 적외선 방식의 같은 광학식이 있

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 첨단메카트로닉스연구그룹 (Advanced Mechatronics R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology) 320, Techno sunhwan-ro, Yuga-eup, Dalseong-gun, Daegu, Republic of Korea  
<sup>2</sup> 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electrical Engineering, Kyungpook National University) 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, Republic of Korea  
 + Corresponding author: dwjung@kitech.re.kr  
 (Received: Sep. 10, 2021, Revised: Sep. 16, 2021, Accepted: Sep. 27, 2021)

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.

으며, 가스센서의 감도와 선택성을 향상시키는 위한 다양한 연구가 진행중이다 [5-7].

특히 감도를 향상시키기 위하여 핵심부품인 광도파관 구조 설계를 통해 적외선 검출부에 입사되는 광량을 증가시키거나 광경로를 길게 하여 가스 분자의 흡수율을 높이는 기술이 요구된다 [8-10]. 최근 높은 선택성과 높은 정확성, 장기 안정성의 이점으로 비분산 방식의 가스센서가 CO<sub>2</sub> 검출용으로 널리 쓰이고 있으나 가격이 비싸다는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 검출용 비분산 적외선 가스센서의 가격을 낮추기 위해, 가스배관 기성품을 이용하여 적외선 검출부에 입사되는 초기 광량을 증가시켜 가스센서의 감도를 향상시킬 수 있는 새로운 광도파관 구조 설계안을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 광도파관 구조에 따른 광 출력 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 비분산 적외선 가스센서의 원리 및 특성

비분산 적외선 방식을 이용한 가스센서는 가스 분자가 특정 파장의 적외선을 흡수하는 특성을 이용하여 가스의 적외선 흡수도를 측정하여 농도로 환산하는 방식이다.

Fig. 1과 같이 비분산 적외선 가스센서는 기본적으로 적외선 광원, 광도파관(가스흡수공간), 광필터, 적외선 검출부로 구성되어 있다. 적외선 광원은 주로 0-10 μm의 연속광을 방사하는 제품을 사용하며, 광도파관은 광원에서 방사된 적외선을 광필터로 이동시키며, 광필터는 가스 분자가 흡수하는 파장대의 광을 투과시키는 역할, 적외선 검출부는 도달하는 적외선 광량을 전기적 신호로 변환하여 가스의 농도를 구한다. CO<sub>2</sub>의 경우 4.26 μm, CO는 약 4.6 μm에 해당하는 파장에서 적외선을 가장 많이 흡수하는 것으로 알려져 있다 [11].

이와 같이 측정 대상 가스의 특정 파장 흡수에 의해 감소된 적외선 에너지는 식(1)에 제시된 Beer-Lambert 법칙을 따른다. 즉, 적외선 검출부에서 측정된 에너지( $I$ )는 측정 대상 가스의 농도( $c$ )와 적외선이 측정 대상 가스를 통과하는 거리( $l$ )에 따라 지수함수적으로 반비례하며, 식(2)와 같이 측정된 에너지에 비례한 미소전압으로 가스 농도를 측정하게 된다 [12].

$$I = I_0 \cdot \exp(-\epsilon c l) = I_0 \cdot \exp(-\alpha(c)l) \quad (1)$$

$$\Delta V = \beta \cdot \Delta I_0 = \beta \cdot [I_0 \cdot 1 - \exp(-\alpha(c)l)] \quad (2)$$

여기서  $I_0$ 는 초기 광 강도(initial intensity),  $\alpha$ (specific absorptivity)는 분자 흡광 계수((cm·ppm)<sup>-1</sup>),  $c$  (concentration)는 측정 대상 가스의 농도(ppm),  $l$ (optical length)은 광원에서 광 검출부까지의 광 경로 길이(m),  $\alpha$  (absorption coefficient)는 측정

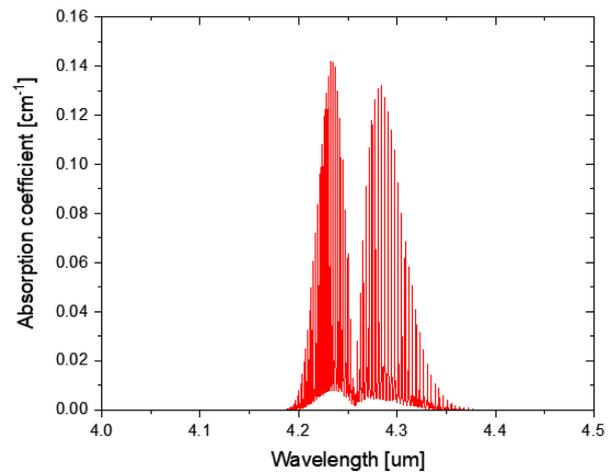


Fig. 2. The CO<sub>2</sub> absorption coefficient spectrum under 500 ppm taken from the HITRAN database.

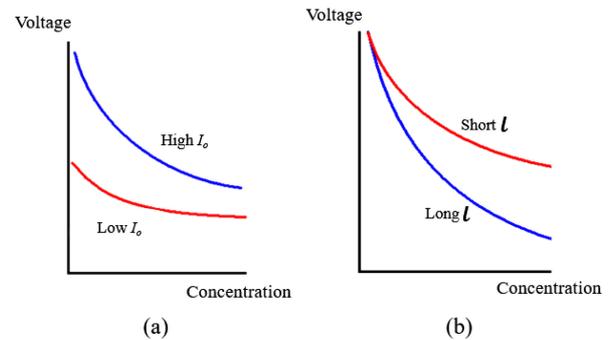


Fig. 3. Output characteristics according to (a) the initial incident light amount,  $I_0$  and (b) the optical path length,  $l$ .

대상 가스의 농도에 따른 흡수계수(cm<sup>-1</sup>),  $\beta$ 는 비례상수이다.

본 연구에서는 비분산 적외선 가스센서의 CO<sub>2</sub>농도 측정 범위가 0-500 ppm이며, CO<sub>2</sub> 농도가 500 ppm 인 경우 파장에 따른 흡수계수는 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 이를 통해 CO<sub>2</sub>인 경우 4.2-4.35 μm의 적외선 파장대역의 흡수 스펙트럼을 가진다는 것을 알 수 있다 [13].

### 2.2 광 도파관 구조 설계 원리

Beer-Lambert 법칙에서 살펴볼 수 있듯이 비분산 적외선 가스센서의 감도 향상을 위해서는 적외선 검출기에 입사되는 초기 입사 광량을 증가(Fig. 3(a))시키거나 광경로를 길게 하여 적외선에 반응하는 가스 분자의 수를 많게 하여 적외선 검출기에 도달하는 입사 광량이 초기 입사 광량에 비해 감소시켜 출력 전압의 변화량을 증가(Fig. 3(b))시키는 것이다. 즉 적외선 검출기에 입사되는 광량이 많을수록 초기 출력전압은 증가하고, 광 경로가 길수록 가스 농도의 변화량에 따른 출력전압의 변화량이 증가하기 때문에 고감도 가스센서를 만들 수 있다. 하지만 광경

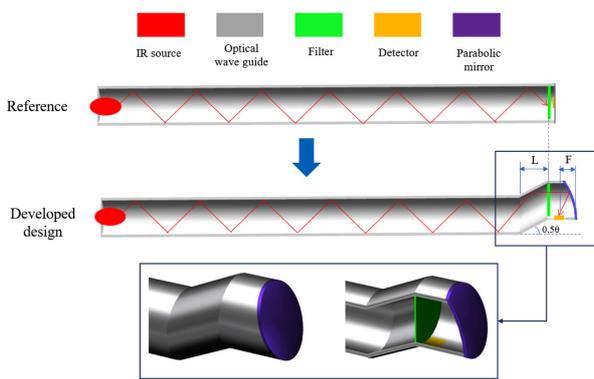


Fig. 4. Design of an optical waveguide for high-sensitivity NDIR gas sensor.

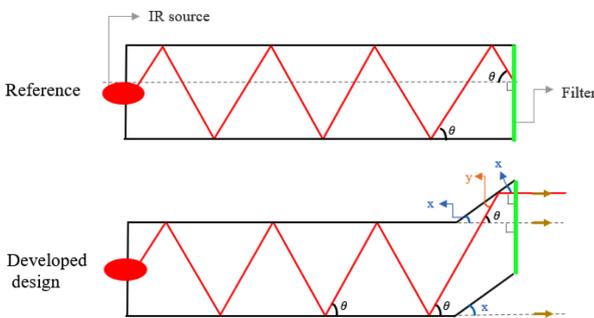


Fig. 5. Diagram for determining tilt angle  $x$ .

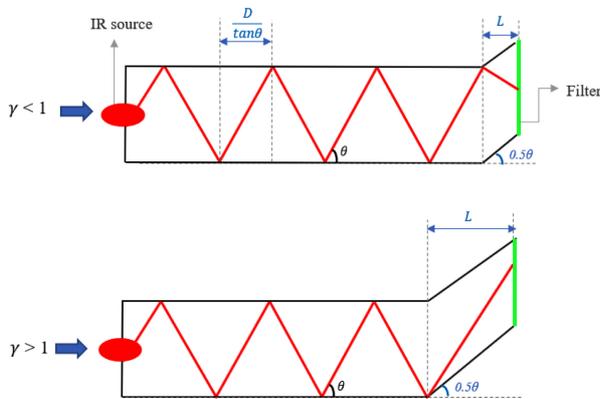


Fig. 6. Diagram for determining the length  $L$ .

로를 길게 하는 방법은 가스센서의 크기가 커지거나, 복잡한 광도파관 구조로 제작 비용이 증가할 수 있으며, 광도파관 내부 반사에 의한 광 손실이 증가하는 단점을 가지고 있다.

CO<sub>2</sub> 경우는 적외선 흡수율이 99% 정도로 높으므로, 이산화탄소 검출을 위한 비분산 적외선 가스센서의 광도파관 구조 설계는 광경로를 길게 하는 것보다는 초기 입사 광량을 증가시키는 방향으로 하는 것이 고감도 가스센서 개발을 위해 효율적이다. 또한, 가스배관 기성품을 이용하여 광도파관 구조를 설계하면 제작 비용을 크게 낮출 수 있다.

그래서 가스배관 기성품을 이용하여 초기 입사 광량을 증가시키는 광도파관 구조 설계 방법은 광도파관의 광필터가 설치된 부분의 일부 구간을 경사지게 설계하여 적외선을 광필터에 수직으로 입사시켜 적외선의 투과율을 높이고, 광필터 후단에 포물면 거울(parabolic mirror)을 설치하여 광필터를 통과한 적외선을 적외선 검출부로 집광 시켜 줌으로써, 가스 센서의 감도를 향상시킬 수 있다.

Fig. 4과 같이 구체적인 방법은 다음과 같다.

첫째, 적외선을 광필터에 수직으로 입사하기 위해서는 기존 광필터 위치(reference)에서 적외선 광원방향으로  $L$ 길이 만큼 떨어진 위치에서  $0.5\theta$ 로 기울여 광도파관 구조를 설계한다.

Fig. 5와 같이  $\theta$ 는 광필터의 주된 입사각을 의미하며, 경사 각도( $x$ )가  $0.5\theta$  여야 하는 이유는 빛의 반사 법칙에 의한 식 (3)와 삼각형의 내각, 외각의 성질에 의한 식 (4)에 의해 도출되었다.

$$y = x \quad (3)$$

$$x + y = 0 \quad (4)$$

또한,  $L$ 길이는 식(5)에 결정할 수 있으며,  $D$ 는 광도파관 내부 직경,  $\gamma$ 는 비례상수를 의미한다. 여기서 비례상수  $\gamma$ 이 1보다 크거나 작으면 Fig. 6과 같이 광필터에 입사되는 적외선이 필터에 수직으로 입사하지 않는 경우가 발생할 수 있기 때문에 본 연구에서는 비례상수  $\gamma=1$ 로 하여 길이  $L$ 를 결정하였다.

$$L = \gamma \frac{D}{\tan \theta} \quad (5)$$

둘째, 필터로 투과된 광을 광 검출기에 집광 시키기 위해 포물면거울(parabolic mirror)을 적용하여 광도파관 구조를 설계한다. 여기서 포물면 형상은 초점거리( $F$ )에 의해 결정되며, 이는 주어진 설계공간에 따라 결정된다. 본 연구에 적용한 초점 거리는 3 mm이다.

## 2.3 모의 해석

### 2.3.1 해석 조건 및 해석 모델

모의 해석은 Lambda Research Corporatin사(社)의 TracePro 소프트웨어를 사용하여 수행하였다.

비분산 적외선 가스센서의 적외선 광원은 주로 microbulb, light emitting diode (LED)가 사용되기 때문에 본 연구에서는 microbulb인 International Light Technologies 사(社)의 1088 T1와 LED인 HAMAMATUS 사(社)의 L15895-0430M을 적용하여 해석을 수행하였다.

적외선 광원 1088 T1인 경우는 방출 에너지 스펙트럼은 Plank 법칙에 의한 방사율(Emissivity) 0.8, 온도는 720 K인 회체

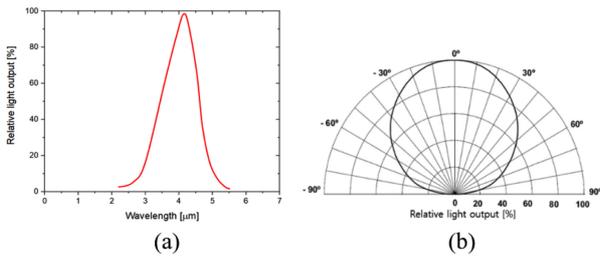


Fig. 7. The optical characteristics for 1088 T1; (a) Graybody spectrum radiation at 720K and (b) Angular distribution for Lambertian pattern.

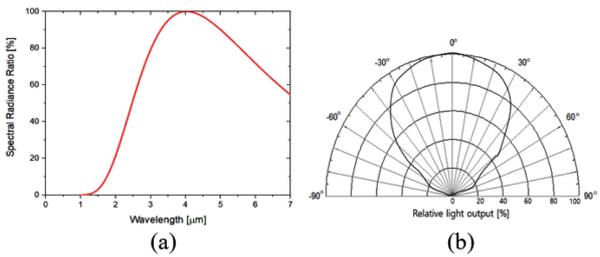


Fig. 8. The optical characteristics for L15895 series; (a) Emission Spectrum (Radiant Flux=1.0 mW) and (b) Angular distribution.

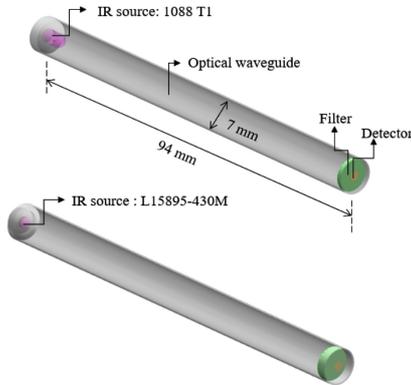


Fig. 9. Geometry simulation model with the simple cylindrical optical waveguide.

(graybody)로 가정하고, 적외선 광원으로부터 빛이 빠져나가는 각도 분포는 Lambertian 패턴으로 가정하였다 [14]. Fig. 7은 이에 따른 1088 T1에서 방출하는 에너지 스펙트럼과 각도 분포를 나타낸다.

적외선 광원 L15895-430M의 방출 에너지 스펙트럼과 각도 분포는 Fig. 8과 같이 제조업체에서 제공하는 데이터시트를 참고하였다 [15].

본 연구에서 제안한 광도파관 설계안의 광 출력 특성을 살펴 보기 위해서는 가스 배관 기성품을 단순 원통형태로 광도파관에 적용하였을 때, 광필터의 주요 입사각( $\theta$ )을 파악해야 한다.

Table 1. Parameters for simulating the NDIR gas sensor.

Parameter	Value
Number of starting raying	10000
Optical waveguide internal reflectance	90%
Parabolic mirror	Perfect Mirror
Bulb material (1088 T1)	Sapphire
Window material (L15895 series)	Si with AR coating

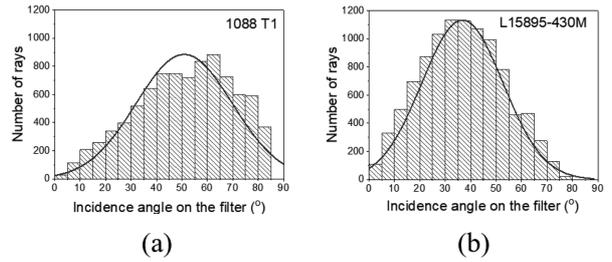


Fig. 10. Statistical distribution of the incidence angle of the filter with the simple cylindrical optical waveguide; (a) 1088 T1 and (b) L15895-430M.

Table 2. Main incidence angle on the filter and  $L$ .

IR source type	$\theta$	$L$ (mm)
1088 T1	50°	5.9
L15895-430M	35°	10

이를 위해 광도파관 내부 직경은 7 mm, 광도파관 총 길이는 94 mm 인 해석 모델(Fig. 9)과 Table 1의 해석 조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 단순 원통형태로 광도파관을 적용한 적외선 광원에 따른 광필터 입사각 분포 해석 결과인 Fig. 10를 통해 L15895-430M의 주된 광필터 입사각은 35°, 1088 T1의 주된 광필터 입사각은 50°임을 알 수 있다.

Table 2는 비분산 적외선 가스센서 감도 향상을 위한 적외선 광원 종류별 광도파관 구조 설계에 필요한 파라메타인 경사 각도(0.5 $\theta$ )와 길이  $L$ 를 나타내며, Fig. 11은 이에 따른 해석 모델이다.

### 2.3.2 해석 결과 및 고찰

CO<sub>2</sub>를 측정하기 위한 비분산 적외선 가스센서의 광필터는

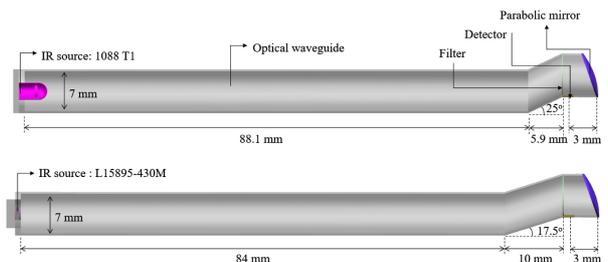


Fig. 11. Optical waveguide structure design of NDIR gas sensor for high sensitivity.

CO<sub>2</sub>가 흡수하는 파장대를 필터링하여 적외선 검출기로 선택적으로 입사시키는 역할로 CO<sub>2</sub>에 의한 출력 차이만 측정 가능하게 만들 수 있기 때문에 가스센서의 성능에 중요한 역할을 한다.

최근 많이 연구되고 있는 광필터는 페브리-페로 간섭계 (Fabry-Perot interferometer)원리를 이용한 페브리-페로 필터이다 [16,17]. 그 구조는 일반적으로 두 개의 고반사율을 가지는 거울 사이에 하나의 cavity가 삽입되어 있고, 여러 파장이 필터에 입사되면 cavity에서 다중간섭현상을 발생시켜 특정한 파장만 투과시키고 다른 파장은 반사시킴으로써 원하는 파장만 투과하게 된다. 이때 식(6)은 투과한 빛의 파장( $\lambda$ )과 cavity 두께( $d$ ) 관계를 나타낸다.

$$\lambda = \frac{2\mu}{m} \cdot \cos \theta \cdot d \tag{6}$$

여기서  $m$ 은 간섭차수(order of interference)이고,  $\mu$ 는 두 거울 사이의 물질의 굴절지수(refraction index)이다.

일반적으로 광필터는 입사각은 0°도로 가정하여 설계한다. 필터 투과 파장이 CO<sub>2</sub>의 최대 흡수 파장인 4.26  $\mu\text{m}$ 인 페브리-페

로 필터의 입사각이 5°이하인 경우, 필터 투과 파장 대역은 4.24-4.27  $\mu\text{m}$ 로 CO<sub>2</sub>흡수 스펙트럼에 포함된다. 그래서 본 연구에서는 페브리-페로 필터를 적용하기 때문에 필터 입사각이 5°이하의 광선(rays)을 분석하였다.

Fig. 12은 Fig. 9과 Fig. 11의 3D 해석 모델 기반으로 적외선 광원 종류별 광도파관 구조에 따른 필터 투과 가능한 광선의 수에 대한 정규 분포를 나타낸다.

1088 T1인 경우, 필터 투과 가능한 광선의 수는 단순 원통형태인 광도파관 구조(reference)에서는 30개, 새롭게 제안한 광도파관 구조(developed design)에서는 113개이다. L15895-430M인 경우, 필터 투과가능한 광선의 수는 단순 원통형태인 광도파관 구조에서는 109개, 새롭게 제안한 광도파관 구조에서는 142개이다. 즉, 단순 원통형태인 광도파관 구조보다는 본 연구에서 새롭게 제안한 광도파관 구조가 필터를 투과 가능한 광선의 수가 1088 T1인 경우는 3.7배, L15895-430M인 경우는 1.3배 증가한다는 것을 알 수 있다.

투과한 광선은 광필터 후면에 설치된 집광구조인 포물선 거울을 통해 적외선 검출부에 도달하게 된다. 이는 제안한 광도파관 구조 설계안은 적외선 검출기의 초기 입사 광량을 증가시켜 센서의 감도를 향상에 기여할 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 검출을 위한 고감도 비분산 적외선 가스 센서의 저가화를 위해 가스배관 기성품을 이용한 새로운 광도파관 구조 설계안을 제안하였다. 구체적으로 광도파관의 광필터가 설치된 부분의 일부 구간을 경사지게 설계하여 광필터에 수직으로 입사하는 적외선을 증가시켜 필터 투과율을 높이고, 필터 후단에 포물면 거울을 설치하여 필터를 통과한 적외선을 적외선 검출부로 집광시켜 초기 입사 광량을 증가시킬 수 있는 새로운 광도파관 구조 설계안을 제시하고, 이를 2가지 종류의 적외선 광원에 대해서 해석을 통해 광 출력 특성을 확인하였다. 해석 결과, 본 연구에서 제안한 광도파관 구조가 단순한 원통형 광도파관 구조보다 필터 투과율이 최대 3.7배 정도 증가하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 광도파관 구조 설계안은 CO<sub>2</sub> 검출을 위한 저가형 고감도 비분산 적외선 가스 센서개발에 기여할 수 있을 거라 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(2020-DD-UP-0348). 본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “유해물질 감지 및 위험상황 방지를 위한 발색/발광 섬유제품 개발

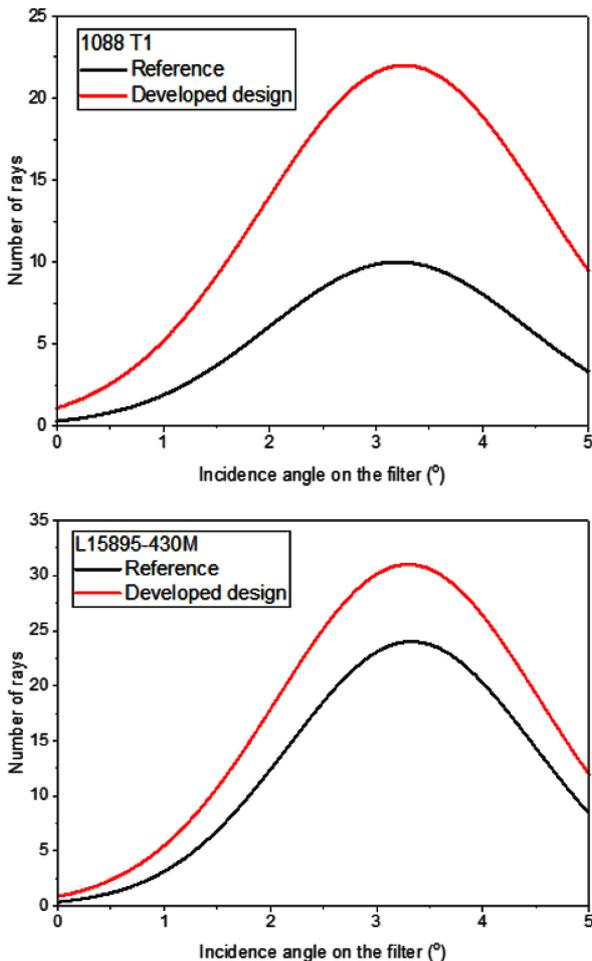


Fig. 12. Simulation results: Statistical distribution of the incidence angle on the filter.

(KITECH EH-21-0007)의 지원으로 수행한 연구입니다.

## REFERENCES

- [1] A. Ortiz Perez, B. Bierer, L. Scholz, J. Wöllenstein, and S. Palzer, "A wireless gas sensor network to monitor indoor environmental quality in schools", *Sensors.*, Vol. 18, No. 12, pp. 1-13, 2018.
- [2] W. Luo, J. Luo, Y. Shuai, K. Zhang, T. Wang, C. Wu, and W. Zhang, "Infrared detector based on crystal ion sliced LiNbO<sub>3</sub> single-crystal film with bcb bonding and thermal insulating layer", *Microelectron Eng.*, Vol. 213, pp. 1-5, 2019.
- [3] G. Visco, L. Campanella, and V. Nobili, "Organic carbons and TOC in waters: an overview of the international norm for its measurement", *Microchem. J.*, Vol. 79, No. 1-2, pp. 185-191, 2005.
- [4] B. Dweik, K. Harrion, and A. Argun, "Rapid determination of Total Organic Carbon (TOC) in water system", *Proc. of the 49th Int. Conf. on Environ Systems*, pp. 1-10, Boston, USA, 2019.
- [5] S. Esfahani, A Tiele, S. O. Agbroko, and J. A. Covington, "Development of a tuneable NDIR optical electronic nose," *Sensors.*, Vol. 20, No. 23, pp. 6875(1)- 6875(16), 2020.
- [6] H. Liu, Y. Shi, and T. Wang, "Design of a six-gas NDIR gas sensor using an integrated optical gas chamber", *Opt. Express*, Vol. 28, No. 8, pp. 11451-11462, 2020.
- [7] S. H. Yi, "Infrared light absorbance: a new method for temperature compensation in nondispersive infrared CO<sub>2</sub> gas sensor", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 5, pp. 303-311, 2020.
- [8] Y. Jing, C. Yuhua, Y. Yupeng, L. Xiaofei, Z. Zuwei, X. Ming, W. Dengpan, M. Jiangdong, M. Yong, and Z. Yuzhe., "Design and optimization of an integrated MEMS gas chamber with high transmissivity", *Digit. Commun. Netw.*, Vol. 7, No. 1, pp. 82-91, 2021.
- [9] J. Hodgkinson, R. Smith, W. O. Ho, J. R. Saffell, and R. P. Tatam, "Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2um in a compact and optically efficient sensor", *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 186, pp. 580-588, 2013.
- [10] Y. J. Jeong, D. H. Kang, J. Y. Seo, Y. J. Jo, J. H. Seo, H. Y. Choi, and M. S. Jung, "An optical cavity design for an infrared gas detector using an off-axis parabolic mirror", *Curr. Opt. Photonics*, Vol. 3, No. 5, pp. 374-381, 2019.
- [11] J. Hodgkinson and R. P. Tatam, "Optical gas sensing: a review", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 1, pp. 012004 (1)- 012004(59), 2012.
- [12] R. V. Maikala, "Modified Beer's Law-historical perspectives and relevance in near-infrared monitoring of optical properties of human tissue", *Int. J. Ind. Ergon.*, Vol. 40, No. 2, pp. 125-134, 2010.
- [13] <http://www.hitran.com/>(retrieved on Jun. 10, 2021.)
- [14] J. Maryrwöger, P. Hauer, W. Reichl, R. Schwodiauer, C. Krutzler, and B. Jakoby, "Modeling of Infrared Gas sensors using a ray tracing approach", *IEEE Sens. J.*, Vol. 10, No. 11, pp. 1691-1698, 2010.
- [15] <http://hamamatsu.com/>(retrieved on Jun. 18, 2021.)
- [16] N. G. Do, J. Lee, D. G. Jung, S. H. Kong, and D. Jung, "Design and performance study of fabry-perot filter based on DBR for a non-dispersive infrared carbon dioxide sensor", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 30, No. 4, pp.250-254, 2021.
- [17] M. S. Rauscher, M. Schardt, M. H. Köhler, and A. W. Koch, "Dual-channel mid-infrared sensor based on tunable Fabry-Perot filters for fluid monitoring applications", *Sens. Actuators B- Chem.*, Vol. 259, pp.420-427, 2018.