

광 도파관이 외부로 노출된 구조를 가지는 비분산적외선 이산화탄소 센서

정동건¹ · 이준엽¹ · 도남곤¹ · 정대웅^{1,+}

Non-dispersive infrared carbon dioxide sensor with an externally exposed optical cavity

Dong Geon Jung¹, Junyeop Lee¹, Nam Gon Do¹, and Daewoong Jung^{1,+}

Abstract

In this study, a Non-Dispersive Infrared (NDIR) Carbon Dioxide (CO₂) sensor with an externally exposed optical cavity is proposed for improving sensitivity. NDIR CO₂ sensors with high performance must use a lamp-type infrared (IR) source with a strong IR intensity. However, a lamp-type IR source generates high thermal energy that induces thermal noise, interfering with the accuracy of the CO₂ concentration measure. To solve this problem, the optical cavity of the NDIR CO₂ sensor is exposed to quickly dissipate heat. As a result, the proposed NDIR CO₂ sensor has a shorter warm-up time and a higher sensitivity compared to the conventional NDIR CO₂ sensor.

Keywords : Infrared, Non-dispersive infrared, Carbon dioxide, Sensor.

1. 서 론

이산화탄소는 대표적인 온실가스로서, 이를 검출/분석하기 위한 센서개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히 탄소 중립 정책이 전 세계적으로 이슈가 되면서 이산화탄소를 정밀하게 감지할 수 있는 고성능 센서에 대한 수요가 기하급수적으로 증가하고 있다 [1-3].

이산화탄소 센서는 감지원리에 따라 전기화학식(electro-chemical)과 비분산적외선(non-dispersive infrared, NDIR) 방식으로 구분할 수 있으며 우수한 선택도(selectivity) 및 감도(sensitivity), 긴 수명 등의 장점을 가지는 NDIR 방식의 이산화탄소 센서의 사용빈도가 점점 증가하고 있다 [4-6]. Fig. 1과 같이, NDIR 이산화탄소 센서는 적외선(Infrared, IR) 광원, 광 도파관(optical cavity) 및 적외선 센서로 구성되어 있으며 NDIR 이산화탄소 센서의 성능 개선을 위해 각 부분들에 대한 연구가 진행되고 있다. 적외선 센서의 경우 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) 기술을 활용한 써모파일(thermophile)·초전형(pyroelectric)·볼로미터(bolometer)형 적외선 센서를 주로 사용하고 있으며, 광 도파

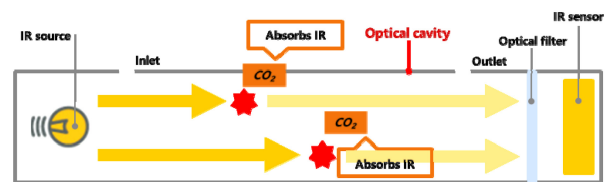


Fig. 1. Schematic of NDIR CO₂ sensor.

관의 경우 높은 반사율 및 긴 수명을 확보하기 위해 금(Au)으로 코팅하여 NDIR 이산화탄소 센서에 적용하고 있다 [7,8]. 적외선 광원의 경우, 램프(lamp)형 또는 발광 다이오드(light emitting diode, LED)형 두 가지 방식의 광원이 빈번하게 사용되고 있으며 램프(lamp)형 적외선 광원은 높은 출력의 적외선을 방출할 수 있으나 발열 문제로 인한 NDIR 이산화탄소 센서의 열 잡음(thermal noise) 문제가 반드시 해결되어야 하며 발광다이오드(LED)형 적외선 광원의 경우 열 잡음 문제는 무시할 수 있으나 낮은 출력의 적외선을 방출하여 고성능의 NDIR 이산화탄소 센서에 적용하기에는 한계가 있다는 단점이 있다.

적용분야에 따라, NDIR 이산화탄소 센서에 요구되는 성능이 달라질 수 있으며 특히 ‘물환경보전법’ 개정으로 인해 최근 이슈가 되고 있는 총유기탄소(total organic carbon) 측정기에 적용하기 위해서는 상대적으로 낮은 농도 범위(0-500 ppm)의 이산화탄소를 정확하게(1 ppm 이하) 측정할 수 있어야 한다. 따라서, 총유기탄소 측정기에 적용하기 위한 NDIR 이산화탄소 센서에는 램프(lamp)형 적외선 광원을 사용하는 것이 효과적이거나 앞서 언급된 발열문제로 인한 열 잡음 문제를 반드시 해결하여야 한다. 램프(lamp)형 적외선 광원 사용 시 발생할 수 있는 열 잡음과

¹ 한국생산기술연구원 안전시스템연구그룹(Advanced Mechatronics Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH))
59, Yangho-gil, Yeongcheon-si, Gyeongsangbuk-do 38822, Korea
⁺Corresponding author: djjung@kitech.re.kr
(Received: Nov. 27, 2021, Revised : Nov. 26, 2021, Accepted : Nov. 30, 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.

관련된 문제는 신호처리회로(read-out integrated circuit) 및 온도보상 알고리즘(algorithm)등으로 해결할 수 있으나, 본 논문에서는 비교적 간단하게 열 잡음 문제를 최소화할 수 있는 간단한 구조를 제안하여 일반적인 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서와 열 잡음으로 인한 성능차이를 비교하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 비분산적외선 이산화탄소 센서의 설계 및 제작

Fig. 2은 일반적인 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서와 본 논문에서 제안한 NDIR 이산화탄소 센서의 개념도 및 제작된 사진이다. NDIR 이산화탄소 센서의 우수한 감도를 위해 높은 적외선 출력을 확보할 수 있는 램프형 적외선 광원(제조사: Helioworks, 모델명: EP-4317)을 사용하였으며, 적외선 센서는 써모파일 방식의 MEMS 적외선 센서(제조사: Hamamatsu, 모델명: T11361-05)를 사용하였다. 램프형 적외선 광원은 약 4.5V의 전압을 인가하여 약 630K로 가열시켰으며 이 때 방출되는 적외선의 피크 파장(peak wavelength)은 4.26 μm으로 이산화탄소 흡수 스펙트럼(absorption spectrum)과 일치한다. NDIR 이산화탄소 센서 내부에 공급되는 이산화탄소 가스들은 4.26 μm파장의 적외선을 매우 강하게 흡수하며, 이 때 흡수된 적외선의 세기를 측정함으로써 이산화탄소의 농도를 정량적으로 측정하게 된다. 출력되는 센서의 신호는 Beer-Lambert 법칙을 따르는데 [9], I_0 는 입사되는 광량을 나타내며, α 는 가스분자의 흡수율, L 는 광 경로 길이, c 가스의 농도를 나타낸다. 따라서, 가스 분자들의 흡수계수가 크고 광 경로 길이가 길수록 출력신호의 변화량이 증가하게 된다.

$$I = I_0 e^{-\alpha L c}$$

따라서 우수한 감도를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서를 개발하기 위하여 광원에서 방출되는 적외선을 다중 반사시켜 긴 광 경로를 확보하기 위한 연구가 가장 활발히 수행되고 있다. 또한, 고감도의 적외선 센서 개발을 통한 NDIR 이산화탄소 센서 성능 향상 연구도 활발히 수행되고 있는데 대부분의 적외선 센서는 주변 온도에 매우 민감하다. 따라서 적외선 센서의 감도가 매우 우수하더라도 NDIR 이산화탄소 센서 주변의 온도 변화를 효과적으로 제어하지 못한다면 이산화탄소의 농도를 정확하게 측정하기 어렵게 된다.

본 논문에서는 NDIR 이산화탄소 센서의 구조를 변경하여 비교적 간단하게 주변 온도 변화로 인한 센서 성능 저하를 최소화시킬 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

일반적인 구조의 NDIR 이산화탄소 센서는 센서 본체(body)에 금으로 코팅된 광 도파관이 삽입되는 형태이며 본 논문에서

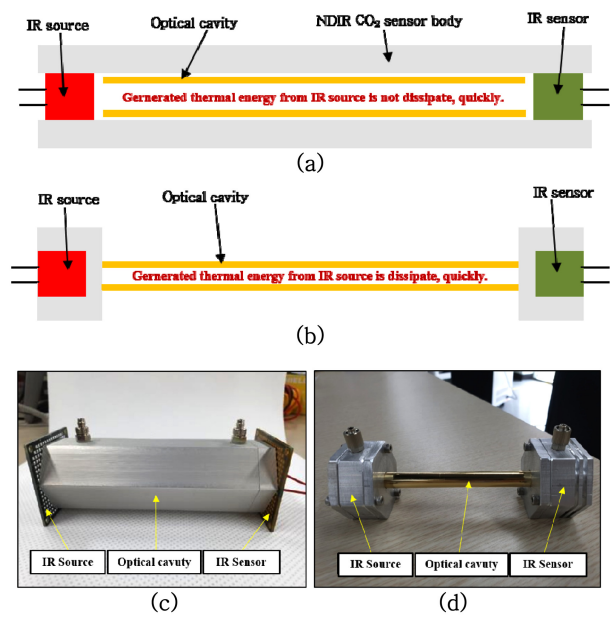


Fig. 2. (a) Conventional structure, (b)proposed structure of NDIR CO₂ sensor, (c) picture of fabricated NDIR CO₂ sensor with conventional structure, (d) picture of fabricated NDIR CO₂ sensor with proposed structure.

제안한 NDIR 이산화탄소 센서는 금으로 코팅된 광 도파관이 본체에 삽입되는 형태가 아닌, 외부로 노출되는 구조를 가지고 있다. 앞서 언급하였듯 램프형 적외선 광원은 높은 적외선 출력을 확보할 수 있지만 높은 온도로 인한 발열문제를 야기시켜 NDIR 이산화탄소 센서에 열 잡음 문제를 발생시킬 수 있다. 일반적인 NDIR 이산화탄소 센서는 광 도파관이 본체에 삽입되어 램프형 적외선 광원으로부터 발생된 열 에너지가 광 도파관으로 전달된 후, 외부로 원활하게 방출되지 못하고 그 결과 지속적으로 열 에너지가 축적되어 NDIR 이산화탄소 센서의 온도가 높아지게 된다. 이는 적외선에서 방출되는 열 에너지를 감지하는 써모파일 방식의 MEMS 적외선 센서 동작에 매우 치명적이며 정확한 적외선 및 이산화탄소 감지를 방해하게 된다.

본 논문에서 제안한 NDIR 이산화탄소 센서는 금으로 코팅된 광 도파관이 본체에 삽입되어 있는 형태가 아닌, 외부에 직접 노출되어 있는 구조이며, 이는 램프형 적외선 광원으로부터 광 도파관에 전달된 열 에너지가 외부로 신속하게 방출될 수 있을 것으로 예상된다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3는 일반적인 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서와 본 논문에서 제안한 NDIR 이산화탄소의 성능을 비교하기 위해 구축된 측정 시스템이며, NDIR 이산화탄소에 가스를 정량적으로 주입하기 위한 MFC (mass flow controller), 적외선 광원 및 센

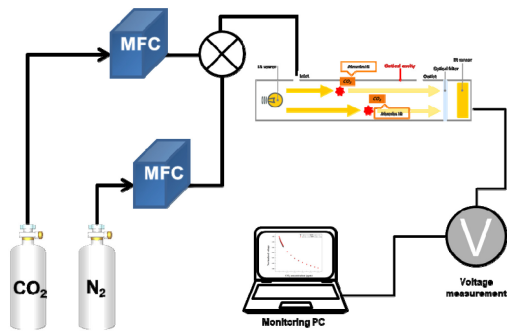


Fig. 3. Experimental set-up for estimating NDIR CO₂ sensor.

서를 구동하기 위한 전원공급장치, 가스 유량 변화에 따른 NDIR 이산화탄소 센서의 출력신호를 측정하기 위한 Source Meter 등으로 구성되어 있다.

일반적인 구조 및 본 논문에서 제안한 NDIR 이산화탄소 센서 모두 적외선 광원 구동 전압으로 4.5V, 적외선 센서 구동 전류로 50 nA가 인가되었다.

가장 먼저, NDIR 이산화탄소 센서 내부에 질소(N₂)를 주입한 후, 출력신호가 포화되는 시간을 측정하였다. 앞서 언급하였듯 이산화탄소는 약 4.26 μm의 적외선을 강하게 흡수하므로 NDIR 이산화탄소 센서 광 도파관 내부에 이산화탄소가 존재할 경우, 적외선 센서에 도달하는 적외선 광량이 감소하게 된다. 이 때, 적외선을 흡수하지 않는 질소(즉, 이산화탄소의 농도가 0 ppm 일 때)를 이산화탄소 주입 전/후에 주입하여 출력신호를 비교함으로써 이산화탄소의 농도를 정량적으로 측정하게 된다. 즉, 질소를 주입하였을 때, NDIR 이산화탄소 센서의 출력신호가 기준신호(reference output signal)가 된다. 따라서, 일정한 기준신호 값을 확보하는 것이 NDIR 이산화탄소 센서 동작에 매우 중요하다. NDIR 이산화탄소에 적용된 램프형 적외선 광원은 높은 온도를 가지며 강한 적외선을 방출하기 때문에 적외선 센서의 출력신호는 지속적으로 증가하며 일정한 시간이 지난 후, 출력신호는 포화되며 이 시간을 일반적으로 warm-up 시간으로 지칭한다. 기준신호 값이 포화되지 않으면, 이산화탄소의 농도를 정확하게 측정할 수 없으므로 반드시 NDIR 이산화탄소 센서의 warm-up 시간이 지난 후 이산화탄소 농도의 농도를 측정하여야 한다. Fig. 4은 질소 주입 후, 일반적인 구조 및 본 논문에서 제안한 NDIR 이산화탄소 센서의 출력신호가 포화되는 시간을 측정한 그래프이다.

제안된 NDIR 이산화탄소 센서의 warm-up 시간은 약 2000초로 일반적인 구조의 NDIR 이산화탄소 센서의 warm-up 시간(약 3000초)보다 단축되었음을 확인할 수 있었다. 이는 제안된 NDIR 이산화탄소 센서가 적외선 광원에서 방출된 열 에너지를 신속하게 방출됨을 의미한다. 따라서, 제안된 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서는 보다 신속하게 이산화탄소 농도 측정이 가능하며 짧은 warm-up 시간으로 인해 불필요하게 소비되는 전력 량

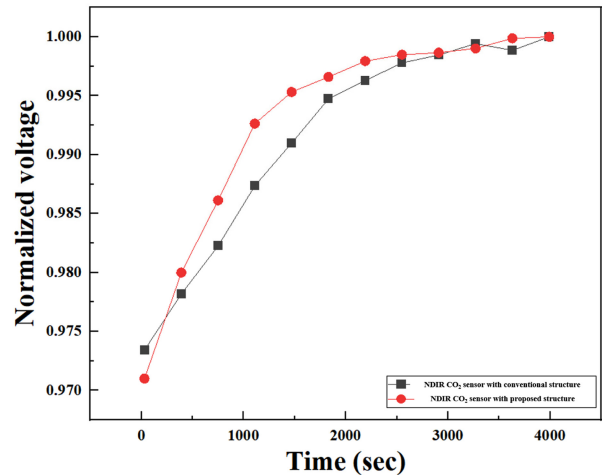


Fig. 4. Output signals of NDIR CO₂ sensor with conventional and proposed structures when 100% N₂ atmosphere.

을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 5는 0–1,000 ppm 및 1,000–10,000 ppm 이산화탄소 농도 범위에서 일반적인 구조 및 제안된 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서의 출력신호를 측정한 그래프이다. y축의 정규화(normalized) 된 출력신호는 기준신호(질소를 주입하였을 때, NDIR 센서의 출력신호)와 임의의 농도를 갖는 이산화탄소를 주입하였을 때 출력신호의 차를 의미한다. 제안된 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서와 일반적인 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서의 출력신호 차이를 확인할 수 있었으며 특히, 저농도(0–3,000 ppm)의 이산화탄소 농도 범위에서 출력신호의 차이가 큼을 확인할 수 있었다. 이산화탄소의 농도가 낮을수록 흡수되는 적외선 광 세기의 변화는 줄어들며 그 결과, 열 잡음으로 인한 출력신호의 왜곡이 심해져 정확한 이산화탄소 농도 측정이 어렵게 된다. 또한, 광 도파관의 온도가 높을수록, 내부에 존재하는 이산화탄소는 높은 운동에너지를 가지며 빠르게 확산(diffusion)하여 광 도파관 내부에 머무는 시간이 짧아지게 된다. 이는 광 경로가 짧아진 것과 동일한 효과를 나타내며 NDIR 이산화탄소 센서 감도를 저하시키며 저농도의 이산화탄소 측정 범위에서 센서 감도 저하 현상이 더욱 심해지게 된다. 이러한 결과는 가스 분자의 흡수계수가 높을수록, 광 경로의 길이가 길어질수록 출력되는 신호의 변화량이 증가하는 Beer-Lambert 법칙을 통해 설명할 수 있다.

NDIR 이산화탄소 센서의 감도 향상을 위해서는 열 잡음으로 인해 발생하는 문제를 반드시 해결하여야 하며 이를 위해 온도 보상을 위한 신호처리회로 및 알고리즘 구현이 필수적이다. 본 논문에서 제안한 NDIR 이산화탄소 센서의 구조를 변화시킨 방법을 활용하면 적외선 광원으로부터 발생하는 열 에너지를 신속하게 외부로 방출시킬 수 있어 비교적 간단하게 열 잡음으로 인한 센서의 감도 저하 문제를 해결 할 수 있게 된다. 또한, 광

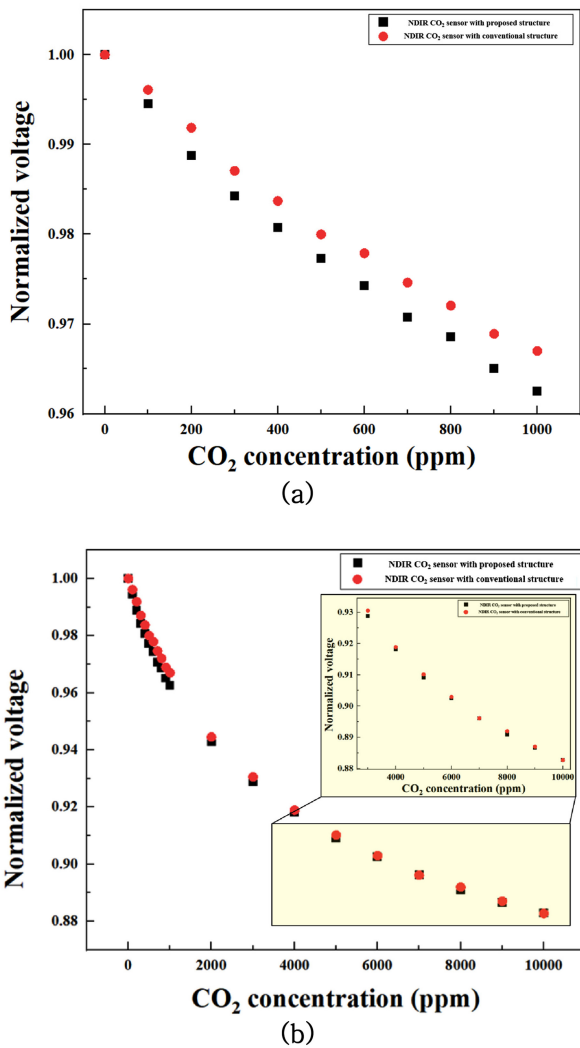


Fig. 5. Output signals of NDIR CO₂ sensor with conventional and proposed structure in CO₂ concentration (a) 0–1,000 ppm, (b) 0–10,000 ppm.

도파관 내부에 존재하는 이산화탄소 가스 분자들의 확산 운동을 저하시켜 적외선 광원과 이산화탄소 가스 분자들이 반응할 수 있는 시간이 길어지게 된다. 즉, 광 경로가 길어진 것과 같은 효과를 얻게 되는데, 이는 긴 광 경로를 확보하기 위하여 고 난이도의 설계 및 공정 기술이 필요하다는 것을 감안하면 제안된 구조가 간단하게 NDIR 이산화탄소 센서의 감도를 향상시킬 수 있는 방법 중 하나라고 사료된다.

4. 결 론

NDIR 이산화탄소 센서의 감도 향상을 위해 적외선 광원의 세기 증가, 긴 광 경로를 가지는 광 도파관의 제작, 우수한 감도

를 가지는 적외선 센서 제작 등 다양한 방법이 제시되고 있다. 그러나 긴 광 경로를 가지는 광 도파관 및 우수한 감도를 가지는 적외선 센서 개발은 높은 설계 및 제작 난이도로 인해 짧은 시간에 상용화 된 NDIR 이산화탄소 센서에 적용하기에 어려움이 있다. 본 논문에서는, 우수한 감도를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서를 개발하기 위해 높은 적외선 광 출력을 갖는 램프형 광원을 사용하였으며, 램프형 광원에서 방출되는 열 에너지로 인한 NDIR 이산화탄소 센서의 성능 저하를 최소화하기 위해 광 도파관을 외부에 직접 노출시킨 구조를 사용하여 비교적 간단하게 NDIR 이산화탄소 센서 성능향상을 도모할 수 있는 방법을 제안하였다. 일반적인 구조 및 제안된 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서 내부의 램프형 적외선 광원을 동작시킨 후 질소를 주입하여 적외선 센서의 출력신호 변화를 관찰하였다. 그 결과, 제안된 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서의 warm-up 시간이 약 2000초로 약 30%이상 단축됨을 확인할 수 있었다. 또한, 0–1,000 ppm 및 1,000–10,000 ppm 이산화탄소 농도 범위에서 제안된 NDIR 이산화탄소 센서가 보다 우수한 감도를 가짐을 확인할 수 있었으며 이는 광 도파관으로 전달되는 열 에너지를 신속하게 외부로 방출하여 열 잡음이 감소하였으며 광 도파관 내부에 존재하는 이산화탄소 가스 분자들의 확산 속도를 저하시켜 마치 광 경로가 길어진 효과를 주는 것으로 사료된다. 그러나, 본체를 제거함으로써 발생할 수 있는 광 도파관의 물리적(흠집, 파손 등), 화학적(부식) 문제들을 해결하기 위한 광 도파관 소재 개발, 외부 보호막 코팅 방법 연구 등이 함께 연구되어야 한다. 최근들어, ‘물환경보전법’이 개정되어 총유기탄소 (total organic carbon) 측정기기에 대한 수요가 급증함에 따라 TOC 측정기기에 적용하기 위한 NDIR 이산화탄소 센서 개발에 대한 필요성이 증가하고 있다. TOC 측정기기에 적용하기 위한 NDIR 이산화탄소 센서는 비교적 낮은 농도(0–500 ppm)의 이산화탄소를 정확하게 감지 가능하여야 하나, 이러한 NDIR 이산화탄소 센서는 대부분 해외 제품을 수입하여 사용하고 있다. 본 논문에서 제안된 구조를 갖는 NDIR 이산화탄소 센서가 비교적 낮은 농도에서의 성능 개선이 더욱 효과적으로 나타나므로 TOC 측정기기에용 국산 NDIR 이산화탄소 센서 개발을 위한 방법 중 하나로 제시될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-DD-UP-0348). 이 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업의 지원으로 수행한 연구임.

이 논문은 2020년도 정부(대구시)의 재원으로 대구테크노파크의 지원을 받아 수행된 연구임(202008105).

REFERENCES

- [1] J. Wang, L. Zheng, X. Niu, C. Zheng, Y. Wang, and F. K. Tittel, "Mid-infrared absorption-spectroscopy-based carbon dioxide sensor network in greenhouse agriculture: Development and deployment", *Appl. Opt.*, Vol. 55, No. 25, pp. 7029-7036, 2016.
- [2] A. Ortiz Perez, B. Bierer, L. Scholz, J. Wollenstein, S. Palzer, "A wireless gas sensor network to monitor indoor environmental quality in schools", *Sensors*, Vol. 18, No.12, pp. 4345(1)-4345(13), 2018 .
- [3] S.L. Wells and J. DeSimone, "CO₂ technology platform: An important tool for environmental problem solving", *Angew. Chem. Int. Ed*, Vol. 40, No. 3, pp. 518-527, 2001.
- [4] T. V. Dinh, I. Y. Choi, Y. S. Son, and J. C. Kim, "A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction", *Sensors Actuators, B Chem.*, Vol. 231, pp. 529–538, 2016.
- [5] L. Fleming, D. Gibson, S. Song, C. Li, and S. Reid, "Reducing N₂O induced cross-talk in a NDIR CO₂ gas sensor for breath analysis using multilayer thin film optical interference coatings", *Surf. Coatings Technol.*, Vol. 336, pp. 9–16, 2018.
- [6] R. Frodl and T. Tille, "A High-Precision NDIR CO₂ gas sensor for automotive applications", *IEEE Sens. J.*, Vol. 6, No. 6 pp. 1697-1705, 2006.
- [7] J. Hodgkinson, R. Smith, W. Ho, J. R. Saffell, R. P. Tatam, "A low cost, optically efficient carbon dioxide sensor based on non-dispersive infra-red (NDIR) measurement at 4.2 μm", *Opt. Sens. Detect. II.*, Vol. 8439, p. 843919, 2012.
- [8] X. Jia, J. Roels, R. Baets, and G. Roelkens, "A miniaturized, fully integrated NDIR CO₂ sensor on-chip", *Sensors*, Vol. 21, No. 16, pp. 5347(1)-5347(14), 2021. *Proc. of SPIE*, vol. 8439, pp. 843919, 2012
- [9] L. Kocsis, P. Herman, and A. Eke, "The modified Beer-Lambert law revisited", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 51, No. 5, pp. N91(1)-N91(8), 2006.