

BSPE24310-021-12

극지용 정밀 CO₂ 분석기 개발 연구

Development of a high-accuracy CO₂ analyzer for polar regions



2025. 02.

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지용 정밀 CO₂ 분석기 개발에 관한 연구”과제의 (최종)보고서로 제출합니다.

2025. 2.



보고서 초록

과제관리번호	PE24310	해당단계 연구기간	2024.3.1.-2025.2.28	단계 구분	총단계
연구사업명	중 사 업 명	연구정책지원 사업			
	세부사업명	신진연구원 지원과제			
연구과제명	중 과 제 명	극지용 정밀 CO ₂ 분석기 개발 연구			
	세부(단위)과제명				
연구책임자	박 근보	해당단계 참여연구원수	총 : 1명 내부 : 1명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 30,000천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설극지연구소		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수
태양열을 가두는 온실기체는 온도 상승과 인간 활동 사이의 중요한 연결 고리이다. 특히 지구가열화의 주요인은 인간 활동에 의한 대기 중 온실기체 농도 증가로 여겨지고 있으며 빙권, 대기권, 해양 그리고 기후 시스템 상당 부분에 대해 관측된 변화에 인간이 얼마나 기여했는지 지속적으로 평가하고 있다(IPCC, 2021a, 2021b, 2022, 2023a, 2023b). 또한 현재 급격한 지구가열화의 영향으로 인해 동토층이 녹아내리면서 과거 동토층 안에 저장되어 있던 막대한 양의 탄소가 대기 중으로 방출되어 지구가열화를 가속할 것이라는 각종 연구가 보고되고 있다. 특히 노출 과정에서 온실 기체중 이산화탄소(CO₂) 가스 발생이 다량 포함되어 있으며 동토에서 발생하는 CO₂가 동토, 대기 그리고 대기-동토 계면(間, Interface)에서 어떤 현상을 유발하고 상호 어떤 영향을 미치는가에 대한 개별 관찰 그리고 상호작용에 관찰이 중요한 분야로 주목을 받고 있다. 이러한 지구가열화로 인해 새롭게 형성된 대기-동토 영역은 빙권을 포함하여 관측 연구에서 극지의 대표적 신규 연구 분야로 자리매김이 예상되고 노출 육지에서 발생하는 CO₂에 의한 대기-동토 변화 정밀 관찰을 통하여 기후변화와 지구가열화 상황을 파악하는 것이 필요하다. 또한 CO₂에 대한 발원 및 흡원 위치 및 강도를 파악하고 그 조절인자를 이해하는 것은 기후변화 예측에 매우 중요한 인자이며 미래 기후변화 예측의 불확실성을 줄이기 위해서는 CO₂ 농도 증가에 따른 피드백 과정의 이해가 미래 기후변화 예측에 매우 큰 역할을 할 것이다. 이를 위해서 전지구 탄소순환에서 CO₂의 주요 발원지와 흡원지에서의 CO₂ 교환량과 조절인자와의 연계를 통한 CO₂ 교환 과정 이해와 지속적인 감시가 필요하며 CO₂ 처리 능력 추정을 검증하기 위해서는 CO₂ 교환에 대한 현장에서의 관측적 연구가 필요하다. 비분산 적외선 방식 센서를 이용해 가스 농도 출력, 전력, 펌프, 통신 시스템 등의 부분을 설계, 제작하여 상용제품 CO₂ 분석기 대비 저가로 CO₂ 분석기를 개발하여 보다 조밀하고 세부적이며 광역적인 지역에서 생태, 기상 또는 환경정보를 수집하고자 한다. 특히 개발된 분석기는 국내 공인기관의 검증, 상용화된 기성품과의 비교, 표준가스를 이용한 실험 등 분석기 개발에 필요한 실증 평가를 수행하였다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	동토, 온실기체, 이산화탄소, 비분산 적외선 CO ₂ 센서, 센서 제어기			
	영 어	Permafrost, greenhouse gas, carbon dioxide, non-dispersive infrared CO ₂ sensor, sensor controller			

요 약 문

I. 제 목

극지용 정밀 CO₂ 분석기 개발 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

비분산 적외선 방식 센서를 이용해 가스 농도 출력, 전력, 펌프, 통신 시스템 등의 부분을 설계, 제작하여 상용제품 CO₂ 분석기 대비 저가로 CO₂ 분석기를 개발하여 보다 조밀하고 세부적이며 광역적인 지역에서 생태, 기상 또는 환경정보를 수집하고자 한다. 이는 CO₂에 대한 발원 및 흡원 위치 및 강도를 파악하고 그 조절인자를 이해하는 것은 기후변화 예측에 매우 중요하고 미래 기후변화 예측의 불확실성을 줄이기 위해서는 CO₂ 농도 증가에 따른 피드백 과정의 이해가 미래 기후변화 예측에 매우 중요하다. 이를 위해서 전지구 탄소순환에서 CO₂의 주요 발원지와 흡원지에서의 CO₂ 교환량과 조절인자와의 연계를 통한 CO₂ 교환 과정 이해와 지속적인 감시가 필요하며 CO₂ 처리 능력 추정을 검증하기 위해서는 CO₂ 교환에 대한 현장에서의 관측적 연구가 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 저전력·고정밀 CO₂ 센서 제어기 개발(하드웨어 설계)
2. 내장형 프로그램(소프트웨어 개발)
3. GUI 설계 및 개발(가시화 소프트웨어 개발)
4. 이동형 모듈 설계/제작
5. 무선센서네트워크 통신 모듈 및 시스템 개발
6. 테스트 및 검증
7. 사용자 테스트

IV. 연구개발결과

1. 비분산 적외선 CO₂ 제어기 설계 및 개발
2. GUI 설계 및 개발
3. 하드웨어 인터페이스 개발
4. 무선센서네트워크 통신 모듈 및 시스템 개발
5. 소프트웨어 및 알고리즘 개발
6. 가스 포집기, 센서 및 이동형 모듈 설계, 제작
7. 비분산 적외선 CO₂ 분석기 통합 및 테스트

8. 비분산 적외선 CO₂ 분석기 프로그램 테스트 및 검증
9. 개발된 분석기의 성능 검증
10. 개발된 분석기의 비교 평가 검증 및 국내 실증 평가

V. 연구개발결과의 활용계획

CO₂ 분석기를 활용한 관측 거점 실증 연구는 기후 변화 대응 및 온실가스 배출 저감을 위한 중요한 기반을 마련할 수 있다. CO₂ 농도의 정확한 측정과 실시간 모니터링을 통해, 국가적 기후 정책 및 환경 관리 전략을 수립할 수 있다. 본 연구에서 다룬 실증 결과와 향후 개선 방향은 CO₂ 분석기 기술의 발전과 함께, 보다 정교하고 효과적인 온실가스 모니터링 시스템 구축에 기여할 수 있을 것이다. 기기 성능 개선, 저비용, 빅데이터 기반 통합 시스템 구축 등은 향후 관측 네트워크의 효과성을 더욱 높일 수 있는 중요한 연구 주제이다.



S U M M A R Y

I. Title

Development of a high-accuracy CO₂ analyzer for polar regions

II. Purpose and Necessity of R&D

The objective of this study is to design and develop a low-cost CO₂ analyzer using a non-dispersive infrared (NDIR) sensor. This involves designing and integrating key components such as gas concentration output, power supply, pump, and communication systems. Compared to commercially available CO₂ analyzers, the proposed system aims to enable high-resolution, extensive, and detailed data collection in ecological, meteorological, and environmental research across broad geographic areas.

Understanding the sources and sinks of CO₂—both their locations and magnitudes—is crucial for predicting climate change. The feedback processes associated with rising CO₂ concentrations play a key role in reducing uncertainties in future climate predictions. To achieve this, continuous monitoring and observational studies are necessary to quantify CO₂ exchange processes in major global carbon cycle regions. This requires linking CO₂ flux measurements with their regulatory factors and verifying CO₂ processing capacity estimates through field observations.

III. Contents and Extent of R&D

1. Development of a low-power, high-precision CO₂ sensor controller (hardware design)
2. Development of embedded software
3. Design and implementation of visualization software (GUI development)
4. Design and fabrication of a mobile module
5. Development of a wireless sensor network communication module and system
6. Testing and validation of the developed system
7. User testing and evaluation

IV. R&D Results

1. Design and development of a non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ controller

2. Design and implementation of a graphical user interface (GUI)
3. Development of hardware interface components
4. Development of a wireless sensor network communication module and system
5. Implementation of software and algorithmic development
6. Design and fabrication of gas samplers, sensors, and mobile modules
7. Integration and testing of the NDIR CO₂ analyzer
8. Program testing and validation of the NDIR CO₂ analyzer
9. Performance verification of the developed analyzer
10. Comparative performance evaluation and domestic field validation of the developed analyzer

V. Application Plans of R&D Results

The field demonstration of CO₂ analyzers at observational sites can serve as a critical foundation for climate change mitigation and greenhouse gas emission reduction efforts. Accurate CO₂ concentration measurements and real-time monitoring can support national climate policies and environmental management strategies.

The findings from this research, along with future improvements, will contribute to the advancement of CO₂ analyzer technology and the establishment of a more precise and effective greenhouse gas monitoring system. Enhancements in device performance, cost reduction, and the development of an integrated big data system will further improve the efficiency of observation networks, making them a significant subject of future research.

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction

1. Purpose
2. Needs
3. Scope

Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations

1. Status in Korea
2. Status in foreign countries

Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results

Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute

Chapter 5 Application Plans of R&D Results

Chapter 6 References

목 차

제 1 장 서론

- 1절. 연구개발의 목적
- 2절. 연구의 필요성
- 3절. 연구범위 및 내용

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1절. 국내의 NDIR 가스 센서 현황
- 2절. 국외의 NDIR 가스 센서 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌



본 문

제 1 장 서론

1절. 연구개발의 목적

비분산 적외선(NDIR, Non-Dispersive Infrared ray) 방식 센서를 이용해 가스 농도 출력, 전력, 펌프, 통신 시스템 등의 부분을 설계, 제작하여 상용제품 CO₂ 분석기 대비 저가로 CO₂ 분석기를 개발하여 보다 조밀하고 세부적이며 광역적인 지역에서 생태, 기상 또는 환경 정보를 수집하고자 한다.

2절. 연구의 필요성

태양열을 가두는 온실기체는 온도 상승과 인간 활동 사이의 중요한 연결 고리이다. 특히 지구온난화의 주요인은 인간 활동에 의한 대기 중 온실기체 농도 증가로 여겨지고 있으며 빙권, 대기권, 해양 그리고 기후 시스템 상당 부분에 대해 관측된 변화에 인간이 얼마나 기여했는지 지속적으로 평가하고 있다(IPCC, 2021a, 2021b, 2022, 2023a, 2023b). 또한 현재 급격한 지구온난화의 영향으로 인해 동토층이 녹아내리면서 과거 동토층 안에 저장되어 있던 막대한 양의 탄소가 대기 중으로 방출되어 지구온난화를 가속할 것이라는 각종 연구가 보고되고 있다. 특히 노출 과정에서 온실기체중 이산화탄소(CO₂) 가스 발생이 다량 포함되어 있으며 동토에서 발생하는 CO₂가 동토, 대기 그리고 대기-동토 계면(間, Interface)에서 어떤 현상을 유발하고 상호 어떤 영향을 미치는가에 대한 개별 관찰 그리고 상호작용에 관찰이 중요한 분야로 주목을 받고 있다. 이러한 지구온난화로 인해 새롭게 형성된 대기-동토 영역은 빙권을 포함하여 관측 연구에서 극지의 대표적 신규 연구 분야로 자리매김이 예상되고 노출 육지에서 발생하는 CO₂에 의한 대기-동토 변화 정밀 관찰을 통하여 기후변화와 지구온난화 상황을 파악하는 것이 필요하다. 또한 CO₂에 대한 발원 및 흡원 위치 및 강도를 파악하고 그 조절인자를 이해하는 것은 기후변화 예측에 매우 중요한 인자이며 미래 기후변화 예측의 불확실성을 줄이기 위해서는 CO₂ 농도 증가에 따른 피드백 과정의 이해가 미래 기후변화 예측에 매우 큰 역할을 할 것이다. 이를 위해서 전지구 탄소순환에서 CO₂의 주요 발원지와 흡원지에서의 CO₂ 교환량과 조절인자와의 연계를 통한 CO₂ 교환 과정 이해와 지속적인 감시가 필요하며 CO₂ 처리 능력 추정을 검증하기 위해서는 CO₂ 교환에 대한 현장에서의 관측적 연구가 필요하다. 그리고 「저탄소 녹색성장기본법(‘10.1.13)」과 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률(‘12.5.14)」에 따라 2015년 1월부터 온실가스 배출권거래제가 시행되고 있다. 배출권 거래제

는 정부가 연단위로 배출권을 할당하고, 실제 온실가스 배출량을 평가하며 여부족분 배출권은 사업장간 거래를 허용하는 제도로 온실가스 배출권거래제에 기반하기 위해서는 온실가스, 특히 CO₂ 측정의 필요한 실정이다.

기술의 발전에 따라 타 산업과 마찬가지로 가스센서도 시장에서는 지속적으로 더 정밀한 센서, 더 낮은 소비전류 센서, 더 낮은 가격의 센서를 요구하고 있다. 더불어 정확도를 유지하면서 이러한 성능을 요구하기 때문에 센서 제조사들은 지속적으로 제품개발과 연구에 더 많은 비용과 시간을 투입해서 대응하고 있지만, 기술 발전의 속도가 느리고 기초과학에서 출발하는 센서기술의 특성상 원천 소재와 부품 등의 동반 발전과 지원이 반드시 필요한 상황이다. 또한 기존의 비분산 적외선 방식 센서의 경우, 광학적인 방법을 이용하기 때문에 시료의 성질에 어떠한 영향도 주지 않으며 또한 반응 시간이 빨라 실시간으로 관측할 수 있고, 수 ppm까지 정밀한 측정이 가능함 동시에 레이저의 교체로서 다른 미량 기체를 측정하고 장수명(10년 이상)인 장점이 있다. 하지만 장비가 고가이고 폐회로 기기 사용에 따른 적절한 보정 및 최적의 시스템 설계가 필요하며, 숙련된 기술자가 필요하다는 단점이 있다. 특히 비분산 적외선 방식은 고가의 광학 부품 및 검출기 사용으로 인한 비용 문제, 응답 속도 및 영점 안정성의 열화, 소형화 및 휴대형 센서에 대한 기술적 제약 등의 한계가 있으며 이러한 한계는 특히 실시간 공기질 모니터링, 사물인터넷(IoT) 기반 센서 네트워크, 또는 저전력 휴대용 기기에 적용될 때 기술적 병목으로 작용한다. 따라서, 기존 기술의 성능을 유지하면서도 소형화, 저전력화, 비용 절감, 그리고 장기 안정성 확보를 동시에 달성할 수 있는 CO₂ 분석기 개발이 절실하다.

따라서 본 연구에서는 비분산 적외선 방식 센서를 이용해 가스 농도 출력, 전력, 펌프, 통신 시스템 등의 부분을 설계, 제작하여 CO₂ 분석기 상용제품 대비 저가이며 정밀한 CO₂ 분석기를 개발하였다. 특히 대기중, 동토층에서 발생하는 CO₂를 분석하기 위하여 각각의 대상에서 발생하는 CO₂의 범위를 고려하고 극지와 같은 저온에서 사용 가능하며 무선으로 데이터를 처리하고 전원공급이 안되는 지역에서도 사용가능한 비분산 적외선 CO₂ 분석기를 개발하였다. 이를 통해 보다 조밀하고 세부적이며 광역적인 지역에서 생태, 기상 또는 환경정보를 수집하고자 한다.

3절. 연구범위

급격한 지구온난화의 영향으로 인해 동토층이 녹아내리면서 과거 동토층 안에 저장되어 있던 막대한 양의 탄소가 대기 중으로 방출되어 지구온난화를 강화할 것이라는 우려가 제기되고 있다(Cory et al., 2013, Schuur et al., 2015). CO₂는 대기 중 온실가스의 주요 구성요소로, 지구온난화와 기후변화의 중요한 원인으로 알려져 있다. 따라서 CO₂ 농도의 정확한 측정과 분석은 환경 모니터링, 온실가스 배출 추적, 공기질 측정 및 다양한 산업 공정에서 중요한 역할을 한다. CO₂ 농도를 측정하는 다양한 방법 중에서 CO₂ 분석기는 대기 중의 CO₂ 농도를 실시간으로 정확하게 측정할 수 있는 주요 도구로 사용된다. 또한 대기중 CO₂ 증가에

대한 우려뿐만 아니라 최근 인간 활동 중심 지역에서의 환경 모니터링 및 산업 공정 관리에 대한 관심이 높아지면서 다양한 센서 기술들이 개발되고 있다. 그중에서도 CO₂ 농도 측정은 기후변화 모니터링, 실내 공기질 제어, 환경 모니터링, 온실가스 배출 모니터링, 그리고 산업 공정에서 중요한 역할을 한다. CO₂ 농도를 정확하게 측정하는 것은 대기 오염을 제어하고, 건강에 유해한 고농도의 CO₂를 방지하는 데 필수적이다. 현대 사회에서 환경 모니터링은 공기질, 온실가스 배출, 기후변화 등에 대한 중요한 데이터를 제공한다.

CO₂ 분석기는 다양한 기술적 원리를 바탕으로 작동하며, 그 성능은 정확도, 정밀도, 응답 시간, 신뢰성 등의 여러 지표에 의해 평가된다. 특히, 환경 및 산업 현장에서는 이러한 분석기의 성능이 매우 중요한데, 잘못된 측정 결과는 기후변화 대응, 공정 최적화 및 공기질 관리 등에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 특히 CO₂ 센서 중에서도 비분산 적외선 CO₂ 분석기는 높은 정확도와 민감도를 자랑하며, 다른 가스들의 영향을 최소화할 수 있어 매우 유용하다. 그러나 이러한 센서를 실제로 활용하기 위해서는 적절한 제어기, 데이터 처리 프로그램, 그리고 직관적인 사용자 인터페이스(GUI)와 사용자와 상호작용할 수 있는 시스템을 설계하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 비분산 적외선 CO₂ 센서의 제어기 설계, 프로그램 구현, GUI 개발 방법을 단계별로 살펴보고, 실제 환경에서 적용을 위한 시스템 설계 및 구현을 제시하고자 한다. 또한 본 장에서는 비분산 적외선 CO₂ 분석기를 개발하는 데 있어 연구의 목표 및 범위를 Table 1에 나타내었다.

분석기를 개발하기 위해 비분산 적외선 CO₂ 센서는 독일의 AIDE - Analytische Instrumente Dessau GmbH사의 AIDE-IR-Gas-Sensors 가스 센서를 사용하였으며 제어기, 무선통신, 이동형 모듈을 설계, 제작하고 CO₂ 분석기의 성능을 검증하고 실증하였다. 목표별 연구 범위와 내용은 Table 1과 같다.

1. 저전력·고정밀 CO₂ 센서 제어기 개발(하드웨어 설계)

센서 모듈 선택 : 비분산 적외선 CO₂ 센서는 AIDE-IR-Gas-Sensors 가스 센서를 사용하였다. AIDE-IR-Gas-Sensors 센서는 적외선 광원, 광학 필터, 광도파관, 그리고 적외선 검출기로 구성된다. 센서의 정확도, 응답 시간, 전력 소비 등을 고려하여 모델을 선택하였다.

마이크로컨트롤러(MCU) 보드 개발 : 센서 데이터를 처리하고 외부와 통신할 수 있는 MCU 기반 제어 보드를 개발하였다. 제어 보드는 센서의 제어, 데이터 수집, 처리, 그리고 통신 기능을 담당한다.

전원 관리 : 센서와 MCU 기반 제어 보드의 전력 소비를 최소화하기 위해 전원 관리 회로를 설계/제작하였다. 배터리 수명 연장을 위해 저 전력 설계와 효율적인 전원공급이 중요하다.

2. 내장형 프로그램(농도 계산 소프트웨어 개발)

센서 인터페이스: 센서와 제어 보드 간의 통신 프로토콜을 구현한다. 일반적으로 I2C, SPI, UART 등의 통신 방식을 사용하며, 센서의 데이터 시트에 따라 적절한 프로토콜을 선택하고 구현한다. 본 연구에서는 UART 방식을 사용하였다.

Table 1 Objectives and scope of research

연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
○ 저전력·고정밀 CO ₂ 센서 제어기(내장형 프로그램 및 GUI 포함) 개발	- 저전력 제어 기술 개발 - 고정밀 CO₂ 센서 인터페이스 개발 및 제작 - 내장형 프로그램(Embedded software) 개발 - 유저인터페이스 개발 및 구현 - 교정 및 보정기능
○ 무선센서네트워크 통신 모듈 및 시스템 개발	- 장치 간 통신 프로토콜 설계 및 구현 - 데이터수집 및 동기 기술 개발
○ 가스 포집기, 센서 및 이동형 모듈 설계, 제작	- 가스 포집기 기구 설계 및 제작 - 이동형 케이스 제작 - 광도파관 센서 구입
○ CO ₂ 분석기 성능 검증 및 분석	- 검증된 고정밀 CO₂ 분석기와 성능비교 검증(자체검증 및 공인기관 한국산업기술시험원, KTL 등 관련기관)
○ CO ₂ 분석기 국내 관측 거점 실증	- 국내의 관측 지점에서 현장 조사 및 실증

데이터 처리: 센서로부터 수집한 원시 데이터를 처리하여 CO₂ 농도를 계산한다. 이 과정에서 온도와 습도 등의 보정이 필요할 수 있으며, 이를 위한 보정 알고리즘을 개발하였다.

3. GUI 설계 및 개발(가시화 소프트웨어 개발)

사용자 요구 분석: 사용자가 센서 데이터를 어떻게 시각화하고 제어할지에 대한 요구 사항을 분석하고, 실시간 CO₂ 농도 그래프, 알람 기능, 데이터 로그 등의 기능을 분석/반영하였다. 즉, UART를 통해 전송된 값을 실시간 차트로 표출하고, uSD에 저장한다.

디자인: 사용자 친화적인 인터페이스를 설계하여 색상, 레이아웃, 아이콘 등을 고려하여 직관적이고 직관적이며 사용하기 쉬운 GUI를 디자인하였다. 플랫폼(예: Windows)에 맞는 개발 환경을 설정하고, GUI를 구현하였다. 이 과정에서 이벤트 처리, 데이터 바인딩, 통신 모듈과의 연동 등을 고려하였다.

4. 이동형 모듈 설계/제작

실외 사용 시 간편한 이동형 타입의 가스 포집기, 케이스 기구 설계 및 제작하였다.

5. 무선 센서 네트워크 통신 모듈 및 시스템 개발

통신 프로토콜: 센서 데이터를 외부 장치나 서버로 전송하기 위한 통신 프로토콜을 구현하였다. 무선통신을 사용할 경우, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee 등의 ISB 밴드 근거리 무선통신 기술을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 고용량 데이터 전송을 위해 Wi-Fi 기술을 사용하여 구현하였다.

6. 테스트 및 검증 : CO₂ 분석기 성능 검증 및 분석하고 국내 거점(표준가스 사용) 실증

기능 테스트: 센서의 정확도, 응답 시간, GUI의 반응 속도 등을 테스트하여 시스템이 요구 사항을 충족하는지 확인하였다.

환경 테스트: 온도, 습도, 전원 변동 등 다양한 환경 조건에서 시스템의 안정성을 테스트하였다.

7. 사용자 테스트: 실제 사용자를 대상으로 GUI의 편의성을 평가하고, 피드백을 받아 개선하였다. 또한 검증된 고정밀 CO₂ 분석기와 성능비교 검증하고 분석기의 성능을 평가할 수 있는 한국산업기술시험원(KTL)에서 성능을 평가/검증하고 국내의 관측 지점(표준가스 사용 극지연구소 또는 서울대학교 환경 대학원)에서 현장 조사 및 실증하였다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절. 국내의 NDIR 가스 센서 현황

CO₂ 농도의 정확한 측정은 대기 환경 모니터링, 실내 공기질 관리, 산업 공정 제어 및 기후변화 연구에 필수적인 요소이다. 다양한 CO₂ 센서 기술이 개발되었지만, 그중에서도 비분산 적외선(NDIR, Non-Dispersive Infrared) 방식은 높은 정확성과 안정성으로 인해 가장 널리 사용되고 있다. 비분산 적외선 CO₂ 센서는 특정 적외선(IR) 파장에서 CO₂ 가스의 흡수를 이용하여 농도를 측정하는 방식으로, 다른 방식에 비해 높은 신뢰성과 장기적인 안정성을 제공한다.

국내의 비분산 적외선 가스 센서는 2005년을 전후하여 처음 상용화되었다. 이전에 비분산 적외선 센서 기술에 대한 개발 노력이 없었던 것은 아니다. LG 전자는 김치냉장고에 적용할 목적으로 개발하였으나 단가 문제로 상용화하지 못한 것으로 알려졌다. 하니웰 코리아는 1990년대 중반부터 지속적으로 개발하였으나 역시 상용화하지 못하였으며 전자부품연구원에서 연구 목적으로 개발하였으나 사업화로 이어지지 못하였다(Ministry of environment, 2009). 최근 국내의 몇몇 연구자들에 의해 감도를 향상시키기 위하여 핵심부품인 광도파관 구조 설계를 통해 적외선 검출부에 입사되는 광량을 증가시키거나 광 경로를 길게 하여 가스 분자의 흡수율을 높이는 기술(Jeong et al., 2019), 새로운 고감도 비분산 적외선 광도파관 구조 설계(Yoon, et al., 2021) 등의 연구가 시작되었으며 주로 비분산 적외선센서의 감도를 높이기 위해 광 경로를 최적화하는 연구가 진행되고 있다. 특히 다중반사 구조(Multi-Pass Cell)를 활용하여 광 경로를 길게 확보함으로써 감도를 증가시키는 방법이 널리 연구되고 있다.

2절. 국외의 NDIR 가스 센서 현황

주로 고가의 계측기에 적용되었던 비분산 적외선 기술은 미국의 Telaire에 의해 고가의 CO₂ 센서를 개발하면서 상용화된 것으로 알려져 있다. Telaire는 광원으로써 미니어처 형태의 백열 광원과 써모파일을 사용하였으며 효과적인 교정 기술을 적용하여 대량 생산할 수 있게 되었다. 스웨덴의 Senseair는 우수한 광학적 특성을 갖는 광도파관을 적용하고 대량 생산 체계를 구축함으로써 기술적으로 한발 정돈 앞선 것으로 평가되고 있다. 현재 Telaire와 Senseair는 현재 세계 시장을 선도하고 있다. 영국의 City technology사는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술을 적용하여 초소형 가스 검지부를 개발하였으며 주로 고농도의 CO₂ 센서용으로 사용된다. City technology사는 비분산 적외선의 고농도 일산화탄소 센서를 개발하였으나 측정 농도의 범위가 수천 ppm 이상이였다. 핀란드의 Visala는 비분산 적외선 센서를 사용하고 있으나 특수 적용처에서 사용되고 가격이 고가이다. 일본의 Yokogawa는 주로 고가의 계측기에 비분산 적외선 기술을 적용한 제품을 생산하고 있다.

(Ministry of environment, 2009). 전통적인 비분산 적외선 센서는 비교적 부피가 크고 전력 소비가 많다는 단점이 있었다. 최근 연구에서는 MEMS 기술을 활용한 소형 적외선 광원과 초소형 열전도 검출기를 개발하여 센서의 크기를 줄이고 전력 소비를 최소화하는 방향으로 발전하고 있다. 최근 기후변화에 의한 CO₂ 측정, 총 유기 탄소 측정과 실내 공기질 측정 등 고정밀 센서들이 광범위한 적용으로 산업계 및 학계에서 많은 관심을 받고 있다 (Visco et al., 2005; Dweik et al., 2019). 현재 CO₂ 검출용으로 상용화된 가스 센서는 반도체식, 전기화학식과 같은 접촉식과 비분산 적외선 방식의 같은 광학식이 있으며, 가스 센서의 감도와 선택성을 향상시키는 위한 다양한 연구가 진행중이다(Esfahani et al., 2020; Liu et al., 2020; Yi, 2020). 최근 높은 선택성과 높은 정확성, 장기 안정성의 이점으로 비분산 방식의 가스 센서가 CO₂ 검출용으로 널리 쓰이고 있으나 가격이 비싸다는 단점이 존재한다.

최근에는 스마트 센서 기술이 비분산 적외선 CO₂ 센서에 적용되면서 센서 자체적으로 데이터 분석 및 보정이 가능해졌다. 이를 통해 실시간으로 정확한 측정이 가능하며, IoT(Internet of Things)와 연계하여 원격 모니터링 및 데이터 수집이 가능해지고 있다. 기존 비분산 적외선 센서는 주로 CO₂ 측정에 최적화되어 있었지만, 최근에는 다중가스 분석 기술이 발전하면서 CO₂뿐만 아니라 CH₄(메탄), CO(일산화탄소) 등의 다양한 기체를 동시에 측정할 수 있는 기술이 개발되고 있다.

국외의 경우 비분산 적외선 CO₂ 센서의 광원 기술의 발전(기존 광원보다 수명이 길고 전력 소비가 적은 LED 기반 IR 광원 개발), 고감도 검출기 연구(기존 열전도 방식보다 더 높은 감도를 가진 양자점(Quantum Dots) 기반 센서 연구), 에너지 자급형 센서 개발(태양광 또는 환경 에너지를 활용한 저전력 CO₂ 센서 연구)에 경주하고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

본 연구에서는 비분산 적외선(NDIR, Non-Dispersive Infrared ray) CO₂ 센서의 제어기 설계, 프로그램 구현, GUI 개발 방법을 단계별로 살펴보고, 실제 환경에서 적용을 위한 시스템 설계 방법론 및 구현 방법을 제시하고자 한다. 또한 CO₂ 센서의 제어와 데이터 처리에 관한 설계를 설명하고, 실용적인 시스템 설계를 위한 구체적인 비분산 적외선 CO₂ 분석기의 개발 과정 및 구현 방법을 제시한다. 또한 비분산 적외선 CO₂ 분석기의 성능 검증과 분석 방법을 다루며, 특히, 분석기 성능을 평가하기 위한 검증 실험도 상세히 논의할 것이다.

1절. CO₂ 센서 제어기 개발

1. 비분산 적외선 가스 센서의 기본 구성

비분산 적외선 방식을 이용한 가스 센서는 가스 분자가 특정 파장의 적외선을 흡수하는 특성을 활용하여 가스의 적외선 흡수도를 측정하여 가스 농도를 측정하는 방식이다. 수분과 타 종류의 가스에 간섭을 받아 측정 정확도가 낮은 반도체 방식, 전기 화학방식에 비해 비분산 적외선 방식은 특정한 가스만을 선택적으로 감지하여 측정하기 때문에 정확도가 매우 높은 특징이 있다. Fig. 1과 같이 비분산 적외선 가스 센서는 기본적으로 적외선 광원(IR lamp), 가스가 들어갔다가 나오는 광도파관(가스 흡수 공간), 적외선 검출부(IR Detector)로 구성되어 있으며 적외선 검출부 앞에는 광 필터가 있다. 적외선 광원은 주로 0-10 μm 의 연속광을 방사하는 제품을 사용하며, 광도파관은 광원에서 방사된 적외선을 광 필터로 이동시키며, 광 필터는 가스 분자가 흡수하는 파장대의 광을 투과시키는 역할, 적외선 검출부는 도달하는 적외선 광량을 전기적 신호로 변환하여 가스의 농도를 구한다.

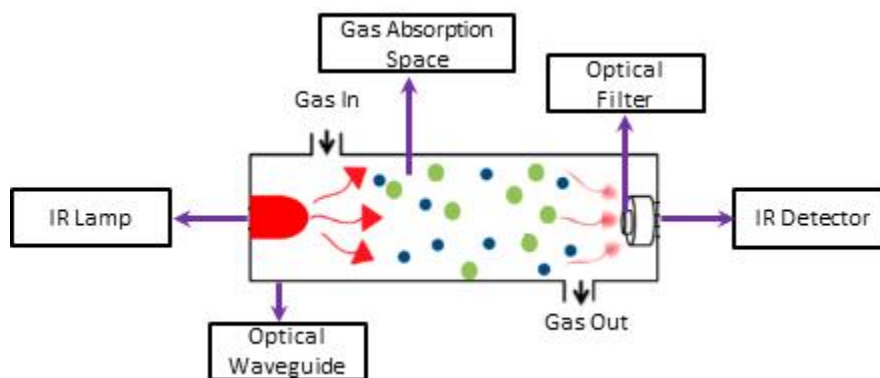


Fig. 1 Schematic of a typical NDIR gas sensor

다음은 Fig. 1에 나타난 명칭별 설명을 나타낸다.

가. 적외선 광원 (IR Lamp): 가스 샘플을 통과할 적외선 빛을 방출하는 소스, 일반적으로 0 ~10 μm 의 연속적인 파장 범위를 가진 광원을 사용한다. 이 광원은 가스 샘플을 통과하

먼서 특정 파장의 적외선이 가스 분자에 의해 흡수된다.

나, 광학 필터 (Optical Filter): 가스 분자가 흡수하는 특정 파장의 적외선만을 선택적으로 통과시키는 역할을 하며 이를 통해 측정 대상 가스의 농도를 정확하게 측정할 수 있다.

다. 광도파관 (Optical Waveguide): 광원에서 방사된 적외선을 광학 필터로 이동시키는 역할을 하며 가스 샘플이 위치한 공간으로 적외선을 전달하여 가스와의 상호작용을 촉진한다.

라. 가스 샘플 공간 (Gas Absorption Space): 가스 샘플이 위치하여 적외선과 상호작용하는 공간이며 가스 분자는 특정 파장의 적외선을 흡수하며, 이에 따라 적외선의 세기가 감소한다.

마. 광 검출기 (IR Detector): 가스 샘플을 통과한 후의 적외선의 세기를 측정하는 장치이다. 측정된 적외선의 세기 감소를 통해 가스 농도를 계산한다.

이러한 구성 요소들이 협력하여 비분산 적외선 가스 센서는 특정 가스의 농도를 정확하게 측정할 수 있다. 예를 들어, CO₂의 경우 4.26μm에 해당하는 파장에서 적외선을 가장 많이 흡수하는 것으로 알려져 있다(Hodgkinson and Tatam, 2012).

2. 비분산 적외선 가스 센서의 측정 원리 및 교정

일반적으로 CO₂는 두 가지 파장에서 다른 흡수 성질을 보인다. 이를 이용해 두 파장의 적외선 빛을 센서에 통과시키고, 그 차이를 측정하여 CO₂ 농도를 계산한다. 이 방식의 주요 장점은 다른 기체들이 흡수하는 파장과 간섭을 최소화할 수 있다는 것이다. 따라서, 다양한 환경에서 정확한 CO₂ 농도 측정이 가능하며, 측정 오차가 상대적으로 적다. 특히 온도, 습도, 압력 등의 외부 요인에 의한 영향을 줄일 수 있다는 큰 장점이 있다. 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 지수 함수적으로 반비례하며, 식(2)와 같이 측정된 에너지에 비례한 미소 전압으로 가스 농도를 측정하게 된다(Maikala, 2010).

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

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

여기서 I_0 는 초기 광 강도(initial intensity), ϵ (specific absorptivity)는 분자 흡광 계수 ((cm·ppm)⁻¹), c (concentration)는 측정 대상 가스의 농도(ppm), l (optical length)은 광원에서 광 검출부까지의 광 경로 길이(m), α (absorption coefficient)는 측정 대상 가스의 농도에 따른 흡수계수(cm⁻¹), β 는 비례상수이다. Beer-Lambert 법칙은 비분산 적외선 가스 센서 개발에 있어서 매우 유용한 이론적 기준이 된다. Beer-Lambert 함수는 가스 농도와 출력 전압 간의 관계를 보여주므로 교정에 있어 유용하게 사용할 수 있다. 비분산 적외선 센서의 교정은 가스

농도와 출력 전압 간의 관계를 도출하여 미지의 출력 전압을 측정하여 역으로 농도를 환산한다.

Beer-Lambert 법칙에서 살펴볼 수 있듯이 비분산 적외선 가스 센서의 감도 향상을 위해서는 적외선 검출기에 입사되는 초기 입사 광량을 증가시키거나 광 경로를 길게 하여 적외선에 반응하는 가스 분자의 수를 많게 하여 적외선 검출기에 도달하는 입사 광량이 초기 입사 광량에 비해 감소시켜 출력 전압의 변화량을 증가시키는 것이다. 즉 적외선 검출기에 입사되는 광량이 많을수록 초기 출력 전압은 증가하고, 광 경로가 길수록 가스 농도의 변화량에 따른 출력 전압의 변화량이 증가하기 때문에 고감도 가스 센서를 만들 수 있다. 하지만 광 경로를 길게 하는 방법은 가스 센서의 크기가 커지거나, 복잡한 광도파관 구조로 제작 비용이 증가할 수 있으며, 광도파관 내부 반사에 의한 광 손실율이 증가하는 단점을 가지고 있다 (Yoon, et al., 2021). 본 연구에서 감도를 높이기 위해 사용된 방법은 필터로 투과된 광을 광 검출기에 집광시키기 위해 포물면거울(parabolic mirror)을 적용하여 광도파관 구조를 설계한 방식을 사용하였다(Fig. 2 참조).

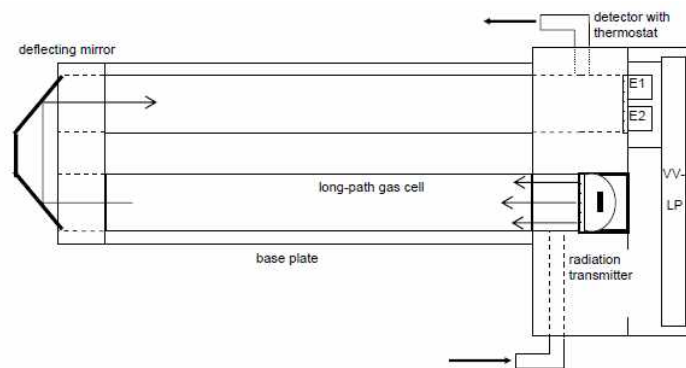


Fig. 2 Optics unit diagram for NDIR gas sensor

3. 저전력·고정밀 CO₂ 센서 제어기(내장형 프로그램 및 GUI 포함) 개발

비분산 적외선 CO₂ 분석기를 개발하기 위해서는 측정하려는 물리량에 대한 측정 범위, 정확도, 사용 범위, 그 외 환경 인자에 대한 보정 등을 종합하여 개발해야 한다. 또한 사용자가 원하는 요구 사항이나 개발되는 시스템의 조건 등을 고려하여 개발한다. 비분산 적외선 CO₂ 분석기는 Fig. 3과 같이 센서를 제외하고도 많은 부속 부품들이 설계/제작/구현되어야 한다. 특히 비분산 적외선 CO₂ 분석기를 개발하기 위해서는 센서 데이터를 효과적으로 수집하고 처리하여 원하는 정보를 제공하는 시스템으로 구축 되어져야 한다. 따라서 비분산 적외선 CO₂ 분석기를 개발하기 위해 센서 제어기 설계 및 구현의 주요 단계에 대한 다음의 요소기술이 필요하다.

- (1) 요구 사항 분석 : 제어기의 목적과 기능을 명확히 한다. 본 연구에서 비분산 적외선 CO₂ 분석기의 경우, CO₂의 경우 적외선 파장을 얻어 농도를 정확하게 측정하는 기능을 설정한다.

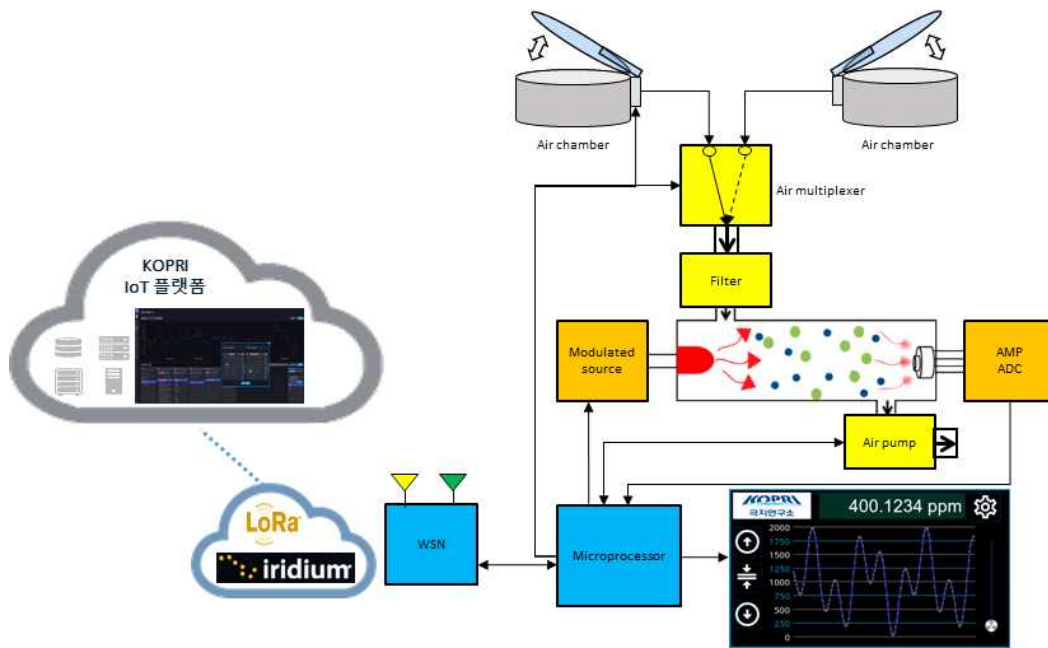


Fig. 3 Schematic diagram of a NDIR CO₂ analyzer

- (2) 환경 분석 : 센서가 작동할 환경 조건(온도, 습도, 전원공급 등)을 고려한다.
- (3) 비분산 적외선 CO₂ 센서 제어기 설계/구현 : CO₂ 센서의 제어기는 주로 MCU나 디지털 신호 처리기(DSP)를 이용해 설계된다. 제어기의 주요 역할은 센서로부터 데이터를 읽어드리고, 이를 처리하여 유용한 출력으로 변환하는 것이다. 제어기는 센서의 정확한 동작을 보장하고, 외부 장치와의 통신을 관리하는 신뢰성과 실시간 처리 능력 등 중요한 기능을 한다.

가. 비분산 적외선 CO₂ 제어기 설계 및 개발

제어기는 크게 센서 초기화, 데이터 수집, 데이터 처리, 통신 관리의 단계로 나눌 수 있다. 센서 초기화는 센서가 정상적으로 동작하는 데 필요한 설정을 수행하는 과정이다. 초기화 과정에서는 센서의 동작 모드를 설정하고, 센서의 보정 값을 설정한다. 예를 들어, 센서의 온도 보정, 전압 보정 등을 진행하여 측정 정확도를 높이는 작업이 필요하다. 데이터 수집 및 처리는 CO₂ 센서에서 주기적으로 데이터를 측정하여 센서 출력 신호를 제공한다. 이 데이터를 처리하는 과정에서는 보정 알고리즘이 매우 중요하다. CO₂ 농도를 계산하기 위해서는 흡수된 적외선 신호를 읽고, 이를 CO₂ 농도로 변환하는 수학적 모델이 필요하다. 일반적으로 두 파장에서의 적외선 흡수 차이를 측정하고 이를 CO₂ 농도로 변환하는 알고리즘을 사용한다. 마지막으로 통신 관리에서는 센서의 데이터를 외부 장치로 전송하기 위해서는 통신 프로토콜을 관리하는 시스템이 필요한데 UART, I2C, SPI 등 다양한 통신 방식을 통해 데이터를 전송할 수 있으며, 제어기는 이들 프로토콜을 처리하는 역할을 한다. 데이터 전송 속도, 신뢰성, 오류 검출 등을 고려하여 적절한 통신 방식을 선택해야 한다. 또한 센서가 고장이거나 비정상적인 데이터를 반환할 때 이를 처리하는 예외 처리 시스템이 필요하다. 예를 들어, 센서의 출

력값이 불가능한 범위에 있을 경우 이를 감지하고 적절한 오류 메시지를 출력하는 방식이다.

본 연구에서는 센서의 정확도와 신뢰성을 위해 질소가스에 대한 실험값으로 센서 초기화를 진행하고 고농도 표준가스 CO₂ 가스(ex. 950ppm CO₂ 표준가스)를 사용해 최대 측정값을 선정하여 보정하였다. CO₂ 농도를 계산하는 알고리즘은 두 과정에서 측정된 신호 차이를 바탕으로 계산하였다. 이 신호 차이는 일정한 보정 계수를 곱하여 최종적인 CO₂ 농도로 변환된다. 알고리즘은 고정된 보정 계수뿐만 아니라 온도, 습도 등의 변수에 따라 동적으로 보정값을 조정할 수 있도록 설계하였다. 이때 센서가 제공하는 원시 데이터는 종종 잡음이 섞여 있을 수 있으며, 외부 환경에 따라 변동성이 크다. 따라서 실시간 데이터 수집 및 처리에서 디지털 필터링과 보정 알고리즘을 사용하였다. 이러한 알고리즘을 통해 센서 데이터의 신뢰성을 높이고, 정확한 CO₂ 농도를 계산하였다. 실시간으로 데이터의 경우, 센서에서 수집된 데이터는 가능한 빨리 처리되어 외부 장치로 전송되어야 하며, 이를 위해 병렬 처리나 멀티스레딩 기법을 사용하였다. 또한, 외부 장치와의 통신 프로토콜을 구현하여, 데이터의 안정적인 전송을 보장하였다. 단계별 제어 알고리즘(소프트웨어 구성도)은 Fig. 4와 같다.

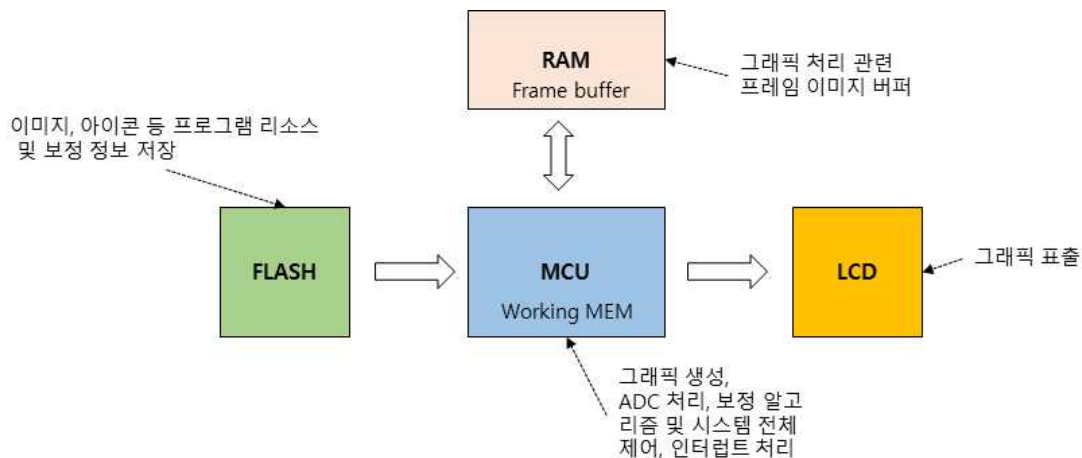


Fig. 4 Software Configuration Diagram for hardware

Fig. 5의 본 연구에서 개발된 전체 제어 구성도에 대한 설명은 다음과 같다.

- (1) Model : 사용자 인터페이스에 표시하거나, 애플리케이션에서 사용될 데이터를 정의하고 관리하는 기능 수행
- (2) View : Model에서 정의되고 연산된 데이터를 표시하고 해당 데이터를 실행할 Presenter로 이벤트를 전달하는 기능 수행
- (3) Presenter : Model과 View에 따라 실행되며 Model에서 결과 데이터를 가져온 후 View에 표시할 수 있도록 형식을 지정하는 기능 수행, Touch 이벤트 발생시 Presenter로 전달하고 업데이트
- (4) Backend module : ADC(CO₂), UART, I2C 등을 통해 센서로부터 데이터를 수신하여 연산하는 기능. 보정 기능, 통신 기능의 역할 수행

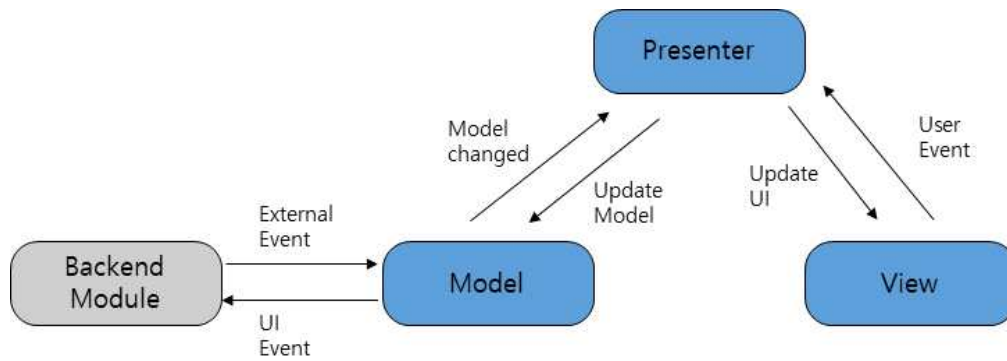


Fig. 5 Overall Software Control Configuration Diagram

Fig. 5의 본 연구에서 개발된 전체 제어 구성도에 따라 다음과 같은 개발 과정을 통하여 저전력·고정밀 CO₂ 센서 제어기, 내장형 프로그램 및 GUI를 개발하였다. 또한 Fig. 6 ~ 14를 통해 설계된 회로도를 나타내었다. 본 연구를 통해 개발한 하드웨어 장치는 크게 CPU 보드와 LCD 보드로 구성된다. CPU 보드와 LCD 보드가 결합된 형태는 Fig. 14와 같다.

(1) 센서 데이터 처리

센서에서 수집한 원시 데이터는 외부 환경요인에 따라 변동성이 크다. 따라서, 데이터를 처리하는 과정에서는 보정 알고리즘이 중요하다. 보정 알고리즘은 센서의 오차를 최소화 하고, 정확한 CO₂ 농도를 계산하는 데 필요한 핵심 요소이다. 예를 들어, 온도와 습도에 따른 변동을 보정하는 알고리즘을 설계하여 더 정확한 데이터를 도출할 수 있다.

(2) 농도 계산 알고리즘

CO₂ 농도를 계산하는 알고리즘은 센서가 수집한 두 개의 파장에서의 흡수 차이를 이용한다. 이 알고리즘은 흡수된 신호 차이를 바탕으로 CO₂ 농도를 산출하며, 보정 계수를 통해 정확한 값을 얻을 수 있다. 이러한 알고리즘은 실시간으로 데이터를 처리할 수 있어야 하며, 계산 속도와 정확성을 고려해야 한다.

(3) 외부 장치와의 통신

센서의 데이터를 실시간으로 외부 시스템에 전달해야 하기 때문에, 통신 방식과 프로토콜 설계해야 한다. 예를 들어, I2C나 UART 통신을 통해 실시간 데이터를 외부 장치에 전송할 수 있다. 이때 데이터의 전송 속도와 안정성은 중요한 요소이며, 에러 검출 및 복구 메커니즘을 고려하여 설계/구현해야 한다. 센서와의 통신을 위한 프로토콜을 정의하고, 이를 GUI와 연동한다.

(4) 보정 알고리즘

비분산 적외선 센서는 CO₂ 농도를 계산하기 위해 흡수 신호를 기반으로 한 알고리즘을 사용한다. 일반적으로, 센서는 CO₂가 흡수하는 두 가지 다른 파장의 신호 차이를 계산하고, 이를 통해 농도를 도출한다. 알고리즘은 환경적인 요인에 따라 데이터를 보정하는 기능도 포함할 수 있다. 온도, 습도 등의 환경 변수를 고려하여 측정값을 보정한다. 이러한 보정은 센서의 정확성과 신뢰성을 높일 수 있다.

(5) 펌웨어 개발:

센서 초기화 : 센서의 전원공급 및 초기 설정을 수행한다. 필요한 파라미터(예: 측정 주

기, 필터 설정 등)를 설정한다.

(6) 데이터 수집

센서로부터 주기적으로 데이터를 수집한다. 수집된 데이터는 가스 농도 계산을 위한 기초자료로 사용된다.

(7) 데이터 처리

수집된 데이터를 필터링하고 필요한 계산을 수행하여 유의미한 정보를 도출한다. 수집된 데이터를 기반으로 가스 농도를 계산한다. Beer-Lambert 법칙을 적용하여 농도를 산출한다.

(8) 하드웨어

Fig. 6은 GUI 등 내장형 프로그램, 센서 데이터 읽기, 데이터 처리, 농도계산 알고리즘, 외부 장치와의 통신을 위한 MCU 보드 전체 하드웨어 구성도를 나타낸다. 주요 하드웨어는 ST 마이크로일렉트로닉스사에서 제공되는 표준형 하드웨어 설계도를 활용하여 구현하였다. MCU는 STM32H7B3L 계열의 고성능 ARM 프로세서를 선정하여 그래픽 관련 처리와 데이터 처리를 용이하게 하였으며, 향후 프로그램의 개선과 확장을 위해 메모리 사이즈는 여유롭게 선정하였다. 또한, STM32H7B3L, IS42S16800J(SDRAM), MX25LM51245GX(Flash)등 주요부품들의 동작온도는 $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$ 이다.

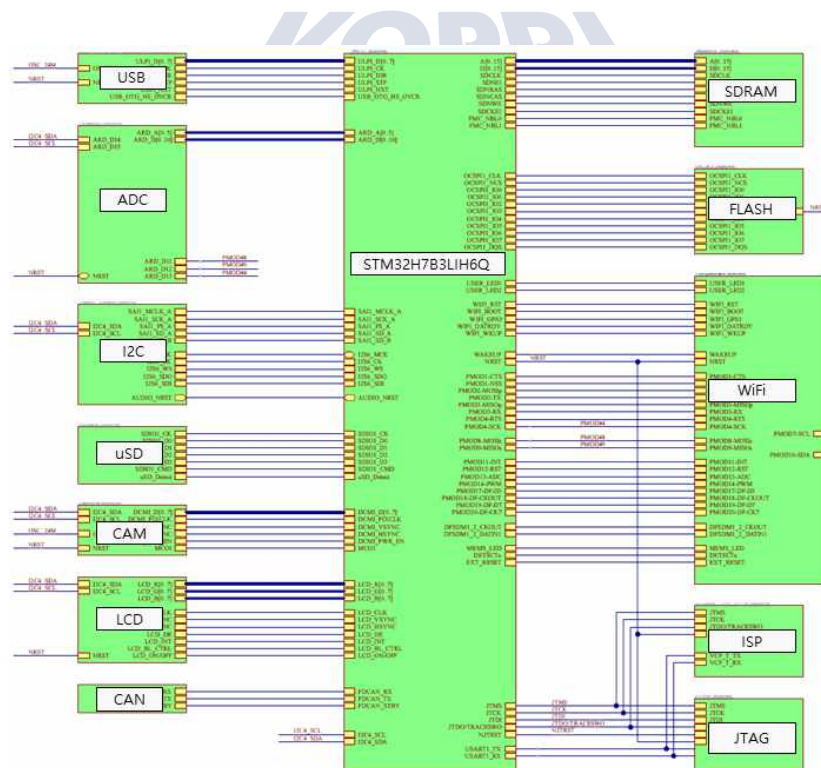


Fig. 6 Full MCU Board Circuit Diagram

Fig. 7은 Fig. 6의 전체 구성도에서 MCU 부분의 상세도를 나타낸다. Fig. 7(a)는 메모리와 uSD 카드를 연결하기 위한 회로도이며 Fig. 7(b)는 LCD 인터페이스와 WiFi 모듈 관련 부분이다.

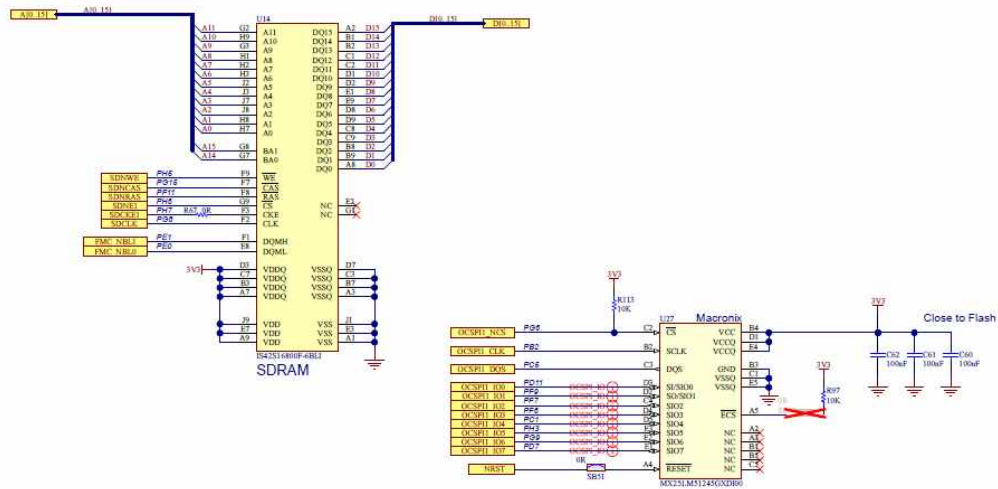


Fig. 9 MCU Board Main Circuit Diagram: Memory

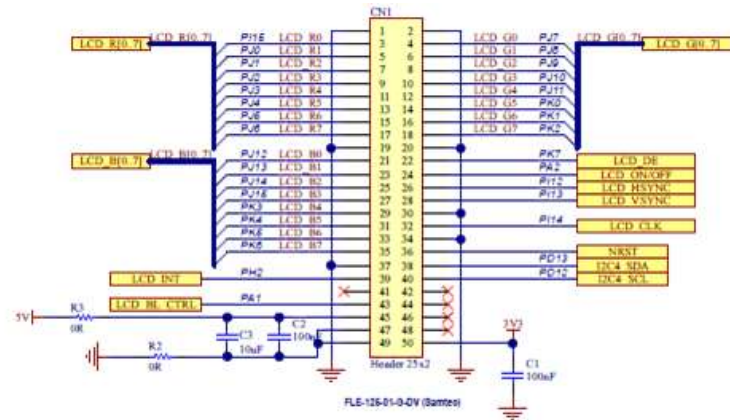


Fig. 10 MCU Board Main Circuit Diagram: LCD

Fig. 11은 uSD 카드 부분의 회로 구성도이다. uSD 카드에는 측정되는 농도 값을 날짜, 시간으로 포함한 scv 파일로 저장하게 한다.

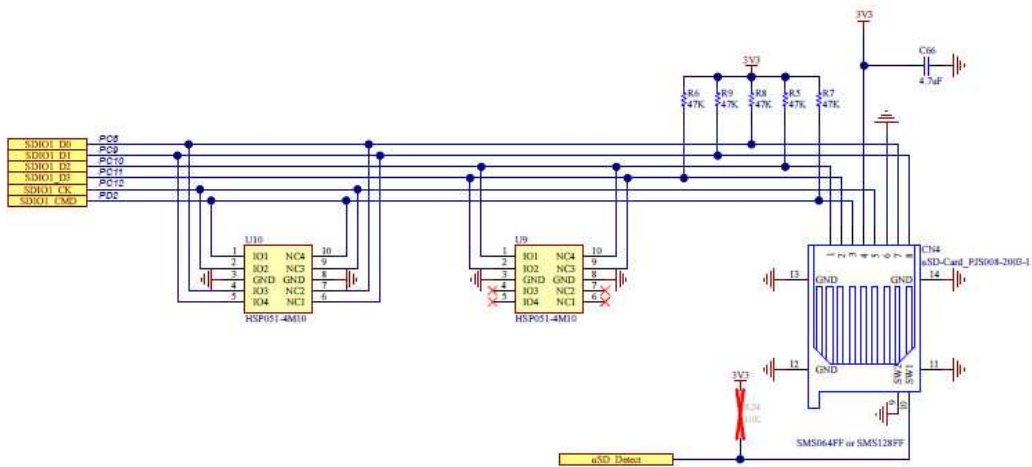


Fig. 11 MCU Board Main Circuit Diagram: uSD

Fig. 12에서 14는 ST 마이크로일렉트로닉스 社에서 기본으로 제공하는 PCB 파일의 형상이다. Altium Designer를 사용하여 설계되었으며 본 연구에서는 설계된 파일을 사용하여 구현하였다. 향후 스위치, USB, ISP(In System Programming) 포트 등 불필요한 부분을 제거하고, 제작할 필요가 있을 것으로 판단된다.

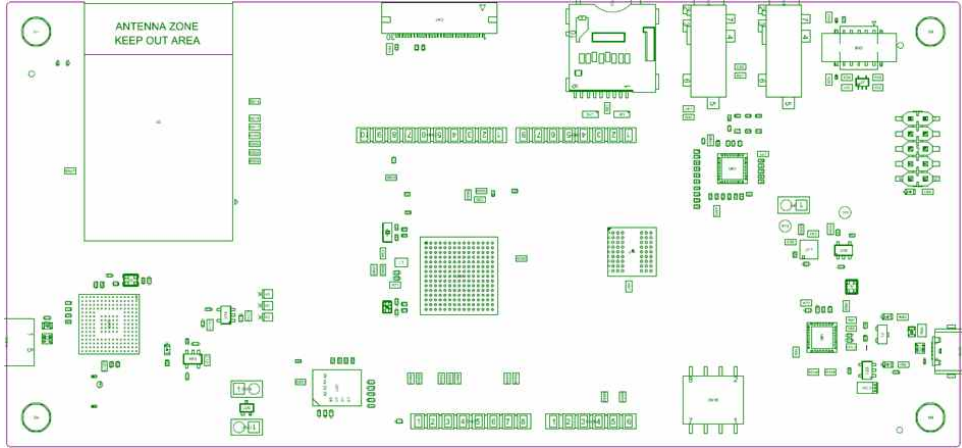


Fig. 12 MCU Board PCB Design File

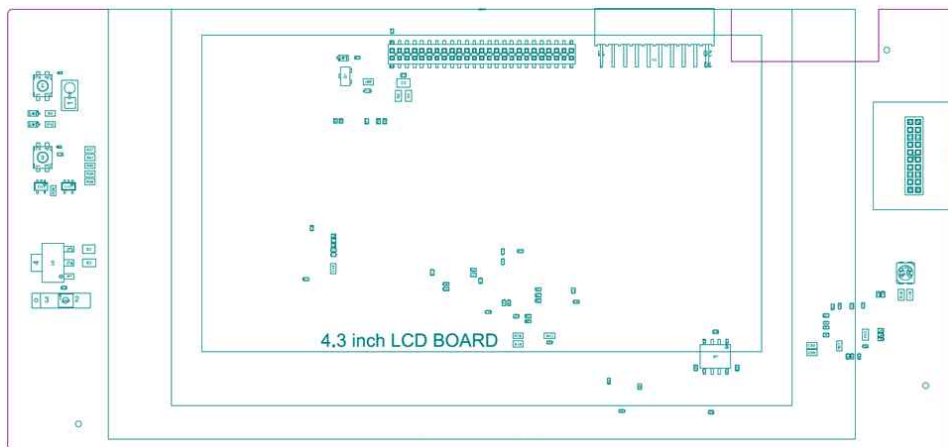


Fig. 13 LCD Board PCB Design File



Fig. 14 Control Board Prototype Production

나. GUI 설계 및 개발

CO₂ 센서 시스템에서 GUI(그래픽 사용자 인터페이스)는 사용자가 센서 상태를 직관적으로 확인하고, 제어할 수 있는 중요한 요소이다. GUI 설계의 목표는 사용자가 실시간으로 CO₂ 농도를 모니터링하고, 설정된 임계값을 초과할 경우 경고를 받을 수 있도록 하는 것이다.

- (1) UI/UX 설계 : 사용자가 센서 데이터를 직관적으로 이해하고 조작할 수 있도록 사용자 인터페이스(UI)를 설계하였다. 이 과정에서는 사용자 경험(UX)을 고려하여 레이아웃, 색상, 버튼 배치 등을 결정한다.
- (2) 화면 흐름 설계 : 사용자가 시스템과 상호작용하는 흐름을 정의한다. 예를 들어, 메인 화면에서 센서 데이터를 확인하고, 설정 메뉴로 이동하여 센서의 동작 모드를 변경하는 등의 흐름을 설계한다.
- (3) 프로토타입 제작 : 디자인한 UI를 바탕으로 프로토타입을 제작하여 실제 사용 환경에서의 반응을 확인하고, 개선점을 도출하여 수정 적용하였다.
- (4) 개발 도구 선택 : PC 환경용 GUI 개발은 Qt를 사용하여 개발하였다.

개발된 주요 GUI 구성요소는 다음과 같다.

- (1) 실시간 CO₂ 농도 표시 : 실시간으로 변하는 CO₂ 농도를 화면에 차트 형태로 표출한다. GUI는 실시간으로 변하는 CO₂ 농도를 사용자에게 시각적으로 제공하였다. 이를 위해 실시간 데이터 처리와 화면 업데이트를 효율적으로 구현하였다.
- (2) 경고 시스템 : CO₂ 농도가 설정된 임계값을 넘을 경우 알림을 제공한다. CO₂ 농도가 설정된 임계값을 초과할 경우 사용자에게 경고 메시지를 제공하는 시스템을 구현하였다. 이 경고 시스템은 시각적, 청각적 알림을 통해 사용자가 즉시 대응할 수 있도록 하였다.
- (3) 데이터 기록 및 시각화 : CO₂ 농도의 변화를 파일형태로 기록하여 시각적으로 표시한다. 실시간 CO₂ 농도 변화뿐만 아니라, 기록된 데이터를 차트나 그래프 형식으로 시각화하여 사용자가 장기간의 데이터를 분석할 수 있도록 하였다. 이는 사용자가 환경 변화에 대한 트렌드를 이해하고 적절한 대처를 할 수 있게 도움을 줄 수 있다.

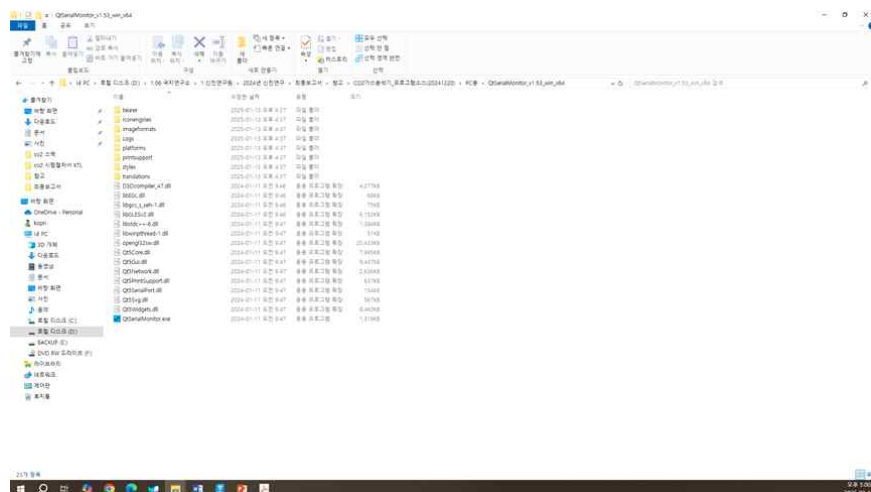


Fig. 15 Developed Program Source

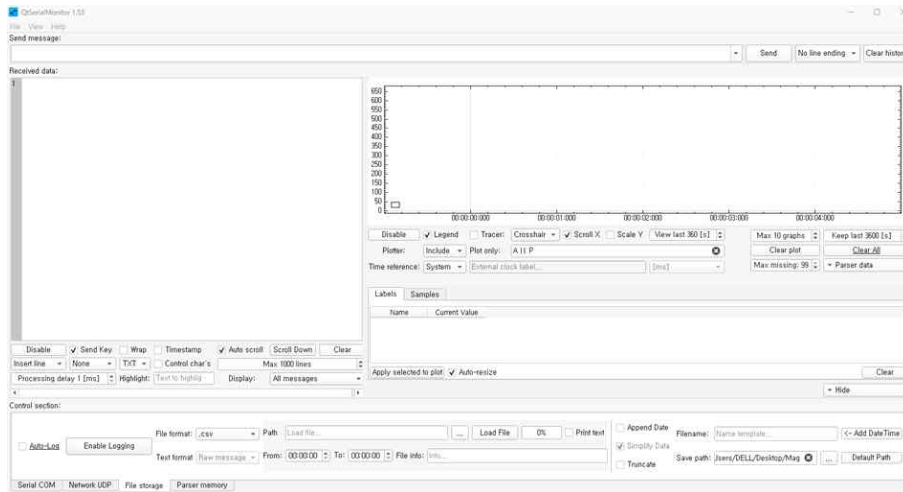


Fig. 16 Developed GUI

본 연구에서 사용된 GUI는 Qt C++을 사용하였다. Qt 기반의 UI는 직관적이고 효율적인 사용자 인터페이스를 제공한다. 데이터 처리와 시각화 기능을 잘 통합할 수 있도록 Fig. 15 같은 프로그램 코드로 Fig. 16과 같이 UI로 구현하였다. 특히 프로그램의 폴더구조는 Fig. 15 와 같다.

다. 하드웨어 인터페이스 개발

센서와의 통신 프로토콜을 구현하였다. 센서의 전원 요구 사항과 전압 레벨을 확인하고 실시간 데이터 처리 및 멀티태스킹을 고려하였다. 또한 에러 처리 및 예외 상황에 대한 대응 로직을 마련하였다.

라. 통합 및 테스트

시스템 개발 후, 하드웨어와 소프트웨어의 통합 및 테스트는 필수적이다. 센서가 정확한 값을 반환하는지, 프로그램이 이를 잘 처리하는지, GUI가 실시간으로 데이터를 정확히 표시하는지를 확인해야 한다. 또한, 센서의 오차나 외부 환경 변화에 따른 보정 알고리즘을 통해 시스템의 안정성을 보장할 수 있다.

- (1) 시스템 통합: 센서 제어기, 내장형 프로그램, GUI를 통합하여 전체 시스템을 구성하였다.
- (2) 기능 테스트: 시스템이 요구 사항에 맞게 동작하는지 확인하였다. 즉, 센서 데이터가 정확하게 측정되고 수집되는지와 수집된 데이터가 GUI에 올바르게 표출되고 파일형태로 저장되는지 확인하였다.
- (3) 성능 테스트: 시스템의 응답 시간, 처리 속도 등을 평가하여 성능을 최적화하였다.
- (4) 사용자 테스트: 실제 사용자를 대상으로 테스트를 진행하여 UI/UX의 직관성과 사용성을 평가하였다.

이러한 단계를 통해 센서 제어기, 내장형 프로그램, GUI를 효과적으로 설계하고 개발할

수 있었다. 각 단계에서의 세부적인 고려 사항과 방법론은 프로젝트의 특성과 요구 사항에 따라 달라질 수 있다.

4. 무선 센서 네트워크 통신 모듈 및 시스템 개발

가. 통신 및 외부 장치 연동

센서에서 측정된 CO₂ 농도 데이터를 외부 시스템과 연동하려면 다양한 통신 기술을 사용할 수 있다. 센서로부터 측정된 데이터를 MCU 기반 제어기와 연동하기 위해 UART 통신을 통해 데이터를 송수신하였다. 제어기에 탑재한 무선통신 기술은 Wi-Fi 이며 외부 시스템과 연결이 가능하다. 저전력 모드를 지원하도록 설계하였으며 저전력 동작 모드 시 수 uA 이하로 동작되도록 구성하였다. 동작 온도 범위는 극한 환경을 고려하여 -40~80℃로 개발하였다. 극저온의 경우 겨울시즌의 온도가 최소 -30℃의 온도 설정이 필요하다. 하지만 이미 적용되어 있는 모니터링 장비와 함께 사용하기 위해 -40℃의 온도에서도 동작 가능한 부품을 적용하여 제어기 보드를 개발하였다.

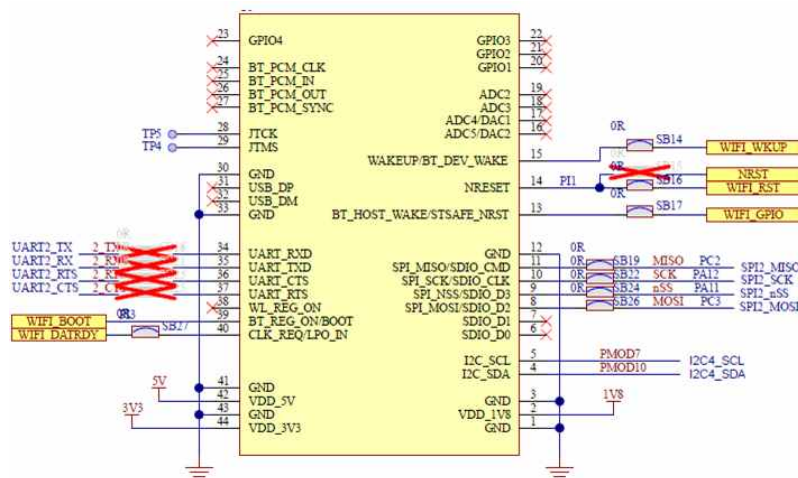


Fig. 17 Wireless communication main circuit diagram

나. RF 통신 장치

고용량 데이터 전송과 연구자의 이동형 PC와 쉽게 연동할 수 있도록 Wi-Fi 통신 기술을 사용하였다. Wi-Fi 통신 방식은 대부분의 전자 기기에 탑재되고 다양한 표준 프로토콜을 제공하여, 장비와 쉽게 연결이 가능하다. Fig. 17은 사용된 모듈의 회로 구성이다.

5. 가스 포집기, 센서 및 이동형 모듈 설계, 제작

이동형 가스 포집기는 기존의 고정형 시스템보다 다양한 환경에서의 적용 가능성을 높이고, 현장에서 신속하게 유해가스를 측정할 수 있는 장점을 제공한다. 이동형 시스템을 설계할 때는 여러 가지 요소를 고려해야 하며, 주요 고려 사항은 운반성, 에너지 효율성, 모듈화된 설계, 유지보수 용이성 등을 고려하여야 한다.

가. 운반성 및 크기

이동형 시스템은 현장에 쉽게 배치하고 이동할 수 있어야 하므로 컴팩트한 크기와 경량화가 중요하다. 또한, 트럭이나 이동 차량에 쉽게 장착할 수 있어야 하므로 모듈화된 설계가 필요하다. 이를 통해 한 번에 여러 대를 운반하거나, 현장에 맞게 쉽게 배치할 수 있다.

나. 에너지 효율성

이동형 모듈은 자원을 절약하면서 효율적으로 작동해야 하므로, 에너지 효율성을 고려한 설계가 필요하다. 재생 가능한 에너지원(태양광, 풍력 등)을 활용하여 이동형 시스템의 에너지 공급을 지속 가능하게 할 수 있다.

다. 모듈화된 설계

이동형 시스템은 여러 개의 모듈로 구성되어야 하며, 각 모듈은 독립적으로 운영될 수 있어야 한다. 모듈화 설계는 시스템의 유연성을 높여주며, 현장 환경에 따라 모듈을 추가하거나 제거할 수 있는 장점이 있다.

라. 유지보수 용이성

이동형 가스 포집 시스템은 지속적으로 현장에서 사용되기 때문에 유지보수가 용이한 설계가 필수적이다. 모듈 간의 연결부위나 중요한 부품들은 쉽게 교체 가능해야 하며, 사용자 매뉴얼을 통해 운영자가 직접 점검하고 유지 보수할 수 있도록 설계/제작해야 한다. 또한, 자동화된 점검 시스템을 도입하여 시스템 이상을 신속히 감지하고 대응할 수 있도록 해야 한다.

본 연구에서는 비분산 적외선 CO₂ 분석기를 흡수기, 흡착기, 필터, 배출가스 처리 장치, 센서 및 제어 장치 등을 시스템화하여 제작한 다음, 가스 포집기 및 이동형 모듈 박스에 최적화하여 구성하였다. 특히 성능, 내구성, 경제성, 내화학성, 내열성 및 방수에 중점을 두었다. 특히 이동형 모듈은 현장에서 가스 포집과 센서 측정을 동시에 수행할 수 있는 통합 시스템으로 구성하였다(Fig. 18 참조). 또한 현장 이동이 용이하도록 경량화 및 컴팩트한 디자인으로 구성하였다. 이동형 가스 포집 시스템은 현장 장기 시험을 통한 성능 검증후 현장 운영 상황에 맞춰 내부부품의 레이아웃을 견고하게 할 필요가 있으며 향후 현장 검증후 내구성을 높일 계획이다.



Fig. 18 Mobile module box

2절. CO₂ 분석기 성능 검증 및 분석

가. CO₂ 분석기 성능 검증의 기준

CO₂ 분석기의 성능을 검증하는 것은 다양한 환경에서 사용을 보장하는 핵심 과정이다. 성능 검증 등 여러 가지 요소를 종합적으로 평가해야 한다.

- (1) 정확도(Accuracy) : 정확도는 측정값이 실제 CO₂ 농도와 얼마나 일치하는지를 나타낸다. 정확도는 주로 표준가스를 이용한 실험을 통해 검증한다. CO₂ 농도가 잘 알려진 표준가스를 사용하여 분석기에서 측정한 값을 비교하고, 오차 범위를 계산하여 정확도를 평가한다.
- (2) 정밀도(Precision) : 정밀도는 동일한 샘플에 대해 반복 측정을 했을 때 결과가 얼마나 일관되게 나오는지를 평가한다. 이는 주로 반복 실험을 통해 평가하며, 분석기의 표준편차나 변동계수(CV, Coefficient of Variation)를 사용하여 측정한다.
- (3) 응답 시간(Response Time) : 응답 시간은 분석기가 CO₂ 농도 변화에 얼마나 빠르게 반응하는지를 나타낸다. 이는 시스템의 민감도와 신속한 변화를 추적할 수 있는 능력을 평가하는 중요한 요소이다. 실험을 통해 변화하는 CO₂ 농도에 대한 분석기의 반응 시간을 측정하여 평가한다.
- (4) 영점 안정성(Zero Drift) : 영점 안정성은 장기간 사용 후에도 분석기가 영점에서 얼마나 안정적인 결과를 보이는지를 나타낸다. 시간에 따른 영점 변화는 분석기 성능에 큰 영향을 미칠 수 있습니다. 일반적으로 일정 시간 동안 측정을 반복하고, 그 결과를 영점과 비교하여 drift를 분석한다.
- (5) 선형성 (Linearity) : 선형성은 분석기의 측정값이 CO₂ 농도의 변화에 대해 얼마나 일관된 선형 관계를 유지하는지를 나타낸다. CO₂ 농도가 증가함에 따라 분석기의 측정값이 일정한 비율로 증가한다면, 해당 분석기의 선형성이 우수하다고 할 수 있다.

본 연구에서 비분산 적외선 CO₂ 분석기에 대한 성능지표 중 센서 부분에 대한 스펙은 다음과 같다.

(1). Effects on span

Zero drift : < 1% of measuring span / 24 hrs <2% in smallest meas. range .
(time-related or manual zero adjustment is feasible)

Sensitivity shift : < 2% of measured value / month

Linearity error : < 2% of measuring span

Fluctuation indication : < +/- 0,5% of measuring span < +/- 1% in smallest meas. range

Detection threshold limit : < 0,5% of measuring span

Consistency : < +/- 1% of measuring span

Main supply effect on span : < 0,2% of measuring span at mains fluctuations

ranging from +10% / -15% and +/- 2Hz frequency change

(2) Air pressure effect on span

< 0,2% of measured value per 10 hPa (ranging from 760 ... 1160 hPa)

Thermal effect on span: < 1% of measuring span / 10K (ranging from +0°C ... 45°C)

(3) Ambient conditions

Storage Operating conditions

Temperature: -25...+70 °C +5...+45 °C

Air humidity: max. 90% r.F. max. 90% r.F.

Atmospheric pressure: 760 - 1160 hPa 760 - 1160 hPa

(4) Operating voltage 5 V ± 0,25 V, max. 3 A, tripple <150 mV (spinodespinode)

(5) Warm-up time max. 5 min

(6) Output signals RS232 interface, baud rate: 9600 Baud *) analogue output signals for each measuring channel : 0,050 ... 1,050 V (electrical output optional)

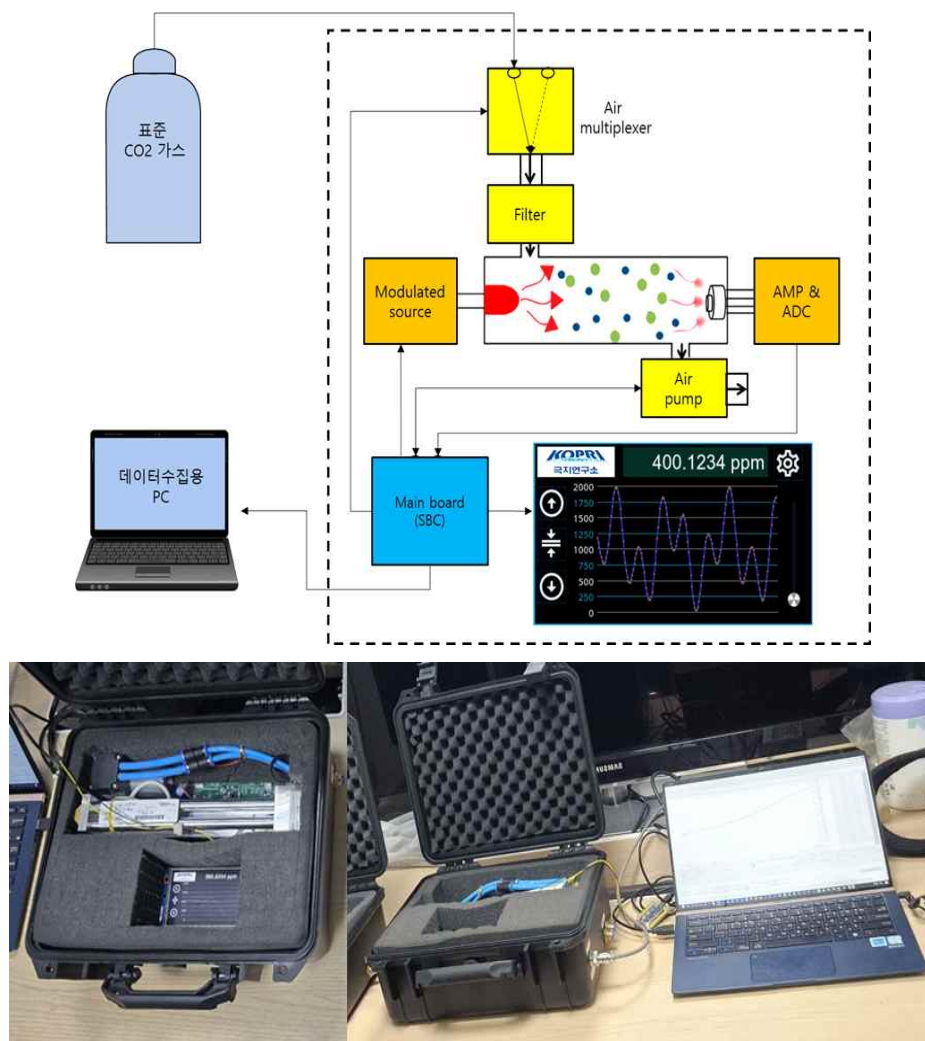


Fig. 19 Test system configuration

나. 프로그램 테스트 및 검증:

개발된 시스템의 정확성과 신뢰성을 검증하기 위해 표준가스를 이용해 다양한 환경에서 테스트를 수행하였다. 이를 통해 시스템의 성능을 평가하고, 필요한 개선 사항을 도출하였다.

이러한 과정을 통해 비분산 적외선 CO₂ 센서의 제어기, 프로그램, GUI를 효과적으로 설계하고 개발할 수 있었다(Fig. 19 참조).

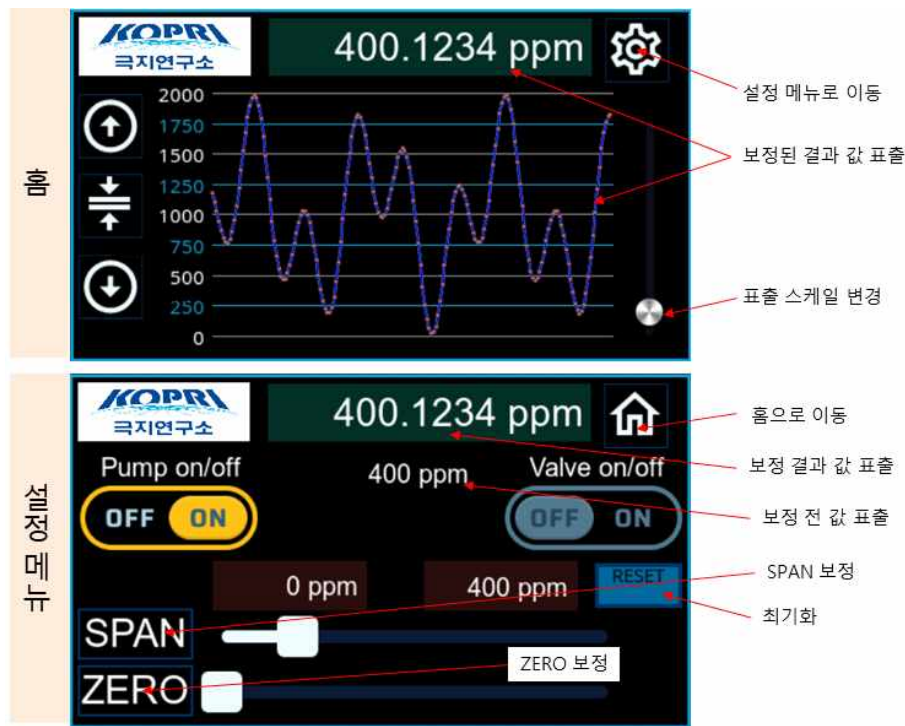


Fig. 20 Integration test results

- (1) 시스템 통합 테스트 : 센서 제어기, 프로그램, GUI를 통합하여 전체 시스템을 구성한다.
- (2) 기능 테스트 : 시스템이 요구 사항에 맞게 동작하는지 확인한다. 예를 들어, 센서 데이터가 정확하게 수집되고, GUI에 올바르게 표시되는지 테스트하였다.
- (3) 성능 테스트 : 시스템의 응답 시간, 처리 속도 등을 평가하여 성능을 확인하였다.
- (4) 사용자 테스트 : 실제 사용자를 대상으로 테스트를 진행하여 UI/UX의 직관성과 사용성을 평가하였다.

본 연구에서는 이러한 단계를 통해 센서 제어기, 프로그램, GUI를 효과적으로 설계하고 개발되었음을 확인할 수 있었다. 각 단계에서의 세부적인 고려 사항과 방법론은 프로젝트의 특성과 요구 사항에 따라 달라질 수 있으며 통합 테스트의 결과를 Fig. 20에 나타내었다.

다. 개발된 분석기의 성능 검증

개발된 CO₂ 분석기의 성능을 검증하는 작업은 기기 및 측정값의 신뢰성을 확보하고, 다양한 조건에서 기기의 정확한 성능을 평가하는 데 필수적이다. 따라서 본 연구에서 개발된 CO₂ 분석기의 성능 검증 및 분석 방법에 실제 환경에서의 분석기 성능 테스트를 통해 실험적

결과를 제시하고 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 반복성(Repeatability), 응답 시간(Response Time), 영점 안정성(Zero Drift)에 대해 실험 데이터로 증명하고 정확도, 정밀도에 대한 부분을 공인기관에서 인증을 받았다.

개발된 분석기의 성능 검증을 위해 다음과 같은 시험 과정을 기반으로 분석기 성능 검증 공인기관인 한국산업기술시험원에서 의뢰하고 검증받았고 결과는 부록에 첨부하였다.

(1) 시험 시스템 구성

본 분석기 개발품은 극지연구소 연구정책지원 사업 지원을 받아 개발한 제품으로 “고정밀 CO₂ 가스 분석기”로 명명하였다. 가스 분석기는 광원, 광수신기, AMP, ADC, 마이크로프로세서(SBC), 표시장치(LCD), 필터, 시료선택기(Multiplexer)로 구성되었고 표준가스는 계측기를 보정하기 위한 2종류 표준 농도 가스와 검증을 위한 1종류의 농도를 사용하였다. 데이터 수집용 PC는 시험데이터를 수집하기 위한 용도이다.

(2) 시험 목표

극지연구에 많이 보급된 고정밀 가스분석기 분야는 LI-COR 社의 제품이 대표적이나 국내 공인인증 기관이 있어 정확도, 정밀도에 대해 LI-COR 社 보다 정밀한 분석기 개발을 시험 목표로 한다.

(3) 시험 절차

- (가) 표준계측기 LI-7810와 본 연구에서 개발한 분석기를 10분간 예열시킴.
- (나) 대상 시험 장비에 표준가스를 사용하여 ZERO, SPAN 각각 5분 교정함.
- (다) 검증용 가스를 5분 이상 측정함. 데이터 수집용 PC에 저장.
- (라) ZERO 교정용 가스를 5분 이상 측정함. 데이터수집용 PC에 저장.
- (마) SPAN 교정용 가스를 5분 이상 측정함. 데이터수집용 PC에 저장.

(4) 결과 분석 방법

시험 절차 ③ ~ ⑤까지 측정된 값을 수식(3)과 같이 10개의 측정데이터를 산출 평균함.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (3)$$

(5) 측정데이터 산출 평균 변수 정의

검증용 가스 : 대상 장비 측정값 평균 T1_mean, 표준계측기 S1_mean 로 정의

ZERO 교정용 가스 : 대상 장비 측정값 평균 T2_mean, 표준계측기 S2_mean 로 정의

SPAN 교정용 가스 : 대상 장비 측정값 평균 T3_mean, 표준계측기 S3_mean 로 정의

(6) 시험 결과값 산출

$$R1 = (1 - \frac{T1_{mean}}{S1_{mean}}) * 100 \quad (4)$$

$$R2 = (1 - \frac{T2_{mean}}{S2_{mean}}) * 100 \quad (5)$$

$$R3 = (1 - \frac{T3_{mean}}{S3_{mean}}) * 100 \quad (6)$$

(7) 시험 평가

R1, R2, R3 모두 정확도로 $\pm 1\%$ 이하이면 합격, $\pm 1\%$ 이상이면 불합격 판정

Table 2와 Fig. 21에서 23에 나타낸 실험 결과, CO₂ 분석기 챔버의 CO₂ 농도가 0.6 ppm일 때(표준가스 CO₂ 농도 0.06ppm), 약 3분간의 시간이 경과해도 CO₂의 표준가스 농도와 일치함을 보여주고 있다. 표준가스 430.12, 953.55ppm에 대해서도 같은 값을 나타내고 있다. 특히 Table 2의 평균과 표준편차 모두에서 의미 있는 값을 나타내고 있어 개발된 시제품의 성능이 보장됨을 알 수 있다. 특히 개발된 분석기의 성능 검증을 위해 분석기 성능 검증 공인 기관인 한국산업기술시험원의 담당자 임회하에 시험을 수행하고 결과의 인증을 받았다.

Table 2 Average and standard deviation for validation of developed analyzer in this study

CO ₂ 농도(ppm)	Average(ppm)	Std.dev.
0.6	0.6483	0.01314
430.12	430.979	0.26659
953.55	958.372	0.3011

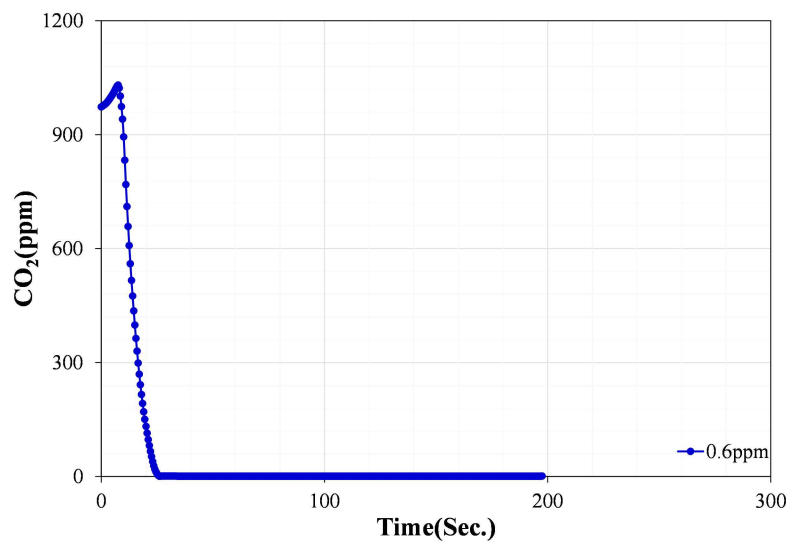


Fig. 21 Test results of developed analyzer verification (0.6ppm)

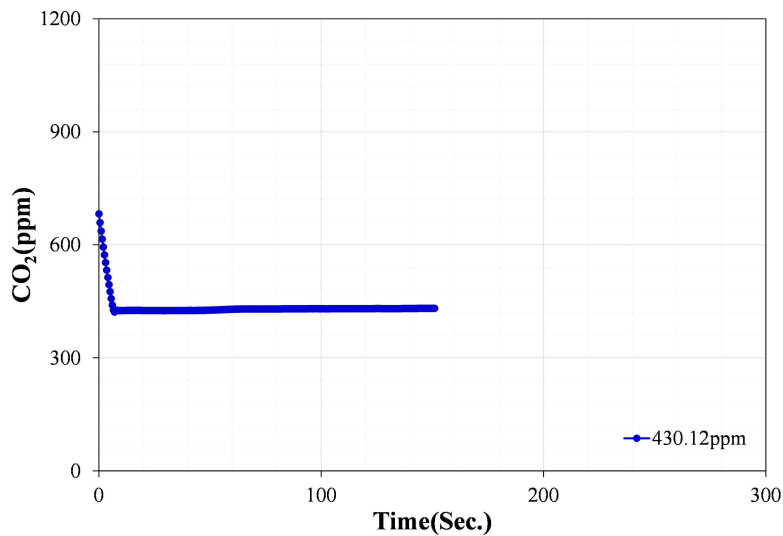


Fig. 22 Test results of developed analyzer verification (430.12ppm)

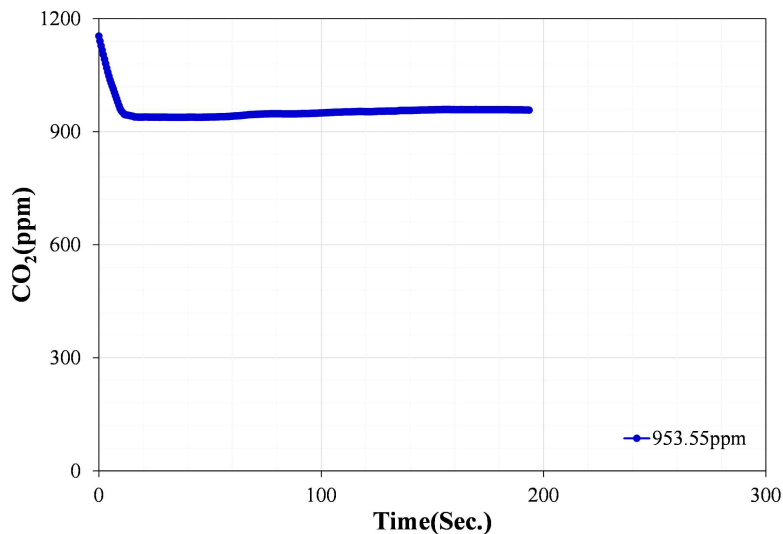


Fig. 23 Test results of developed analyzer verification (953.55ppm)

라. 개발된 분석기의 비교 평가 검증 및 국내 실증 평가

개발된 분석기에 대한 가장 기본적인 성능 검증 방법은 표준가스를 사용하여 검증하는 방법이다. 분석기가 측정한 CO₂ 농도 값과 표준가스에서 제공하는 농도를 비교하여 정확도를 확인할 수 있다. 이때 표준가스의 농도는 미리 정확하게 알려져 있어야 하며, 여러 농도의 표준가스를 사용하여 전체 범위에서 분석기의 성능을 점검한다. 본 연구에서는 본 성능 검증과 같은 방법으로 비교 시험을 위해 개발된 분석기와 LI-COR 社の LI-7810제품으로 동시에 시험을 수행하여 평가하였다.

Table 3과 Fig. 24에서 26까지에 나타난 실험 결과, CO₂ 분석기 챔버의 CO₂ 농도가 0ppm일 때(표준가스 CO₂ 농도 0.009ppm), 5분간의 시간이 경과해도 CO₂의 표준가스 농도와 일치함을 보여주고 있다. 표준가스 429.86, 953.55ppm에 대해서도 같은 값을 나타내고 있다.

특히 Table 3의 평균과 표준편차 모두에서 의미 있는 값을 나타내고 있어 개발된 시제품의 성능이 보장됨을 알 수 있다. 또한 LI-COR 社의 LI-7810 제품과 비교 결과 0 ppm일 때(표준가스 CO₂ 농도 0.009ppm), 표준가스 429.86, 953.55ppm에 대해서도 평균과 표준편차 모두에서 의미 있는 값을 나타내고 있다. 특히 Fig. 26에서 개발된 분석기와 LI-7810 제품의 결과 데이터를 이용한 1대1 그래프에서 본 연구에서 개발된 분석기와 LI-7810 제품의 데이터가 일치하는 결과를 나타내고 있어 CO₂ 분석기로서 충분한 가치가 있는 것으로 판단된다.

Table 3 Average and Std. dev. for the analyzer developed in this study

CO ₂ 농도(ppm)	Average(ppm)	Std.dev.
0.009	0.00187	0.005186215
429.86	429.934	0.226383171
953.55	951.049	0.56031892

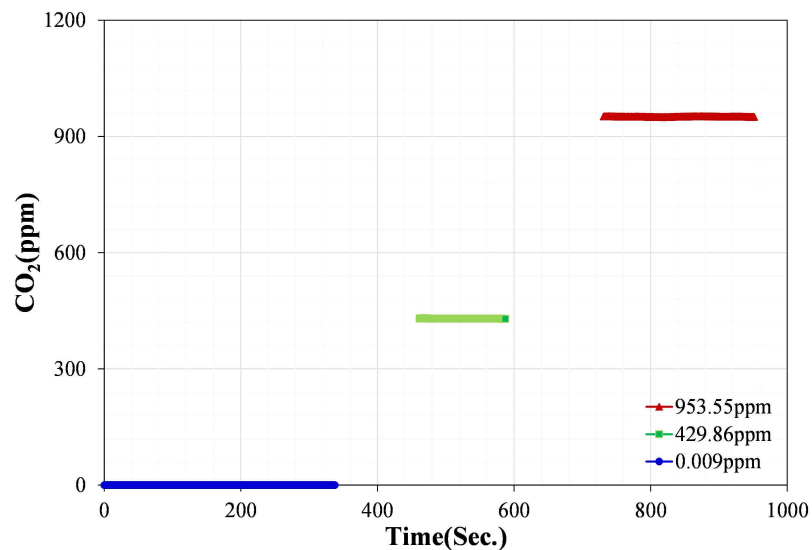


Fig. 24 Test results of developed analyzer

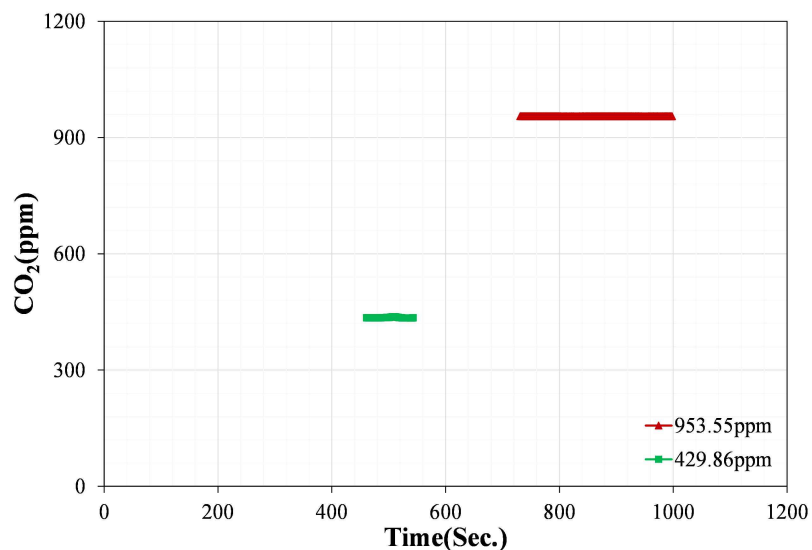


Fig. 25 Test results for LI-7810

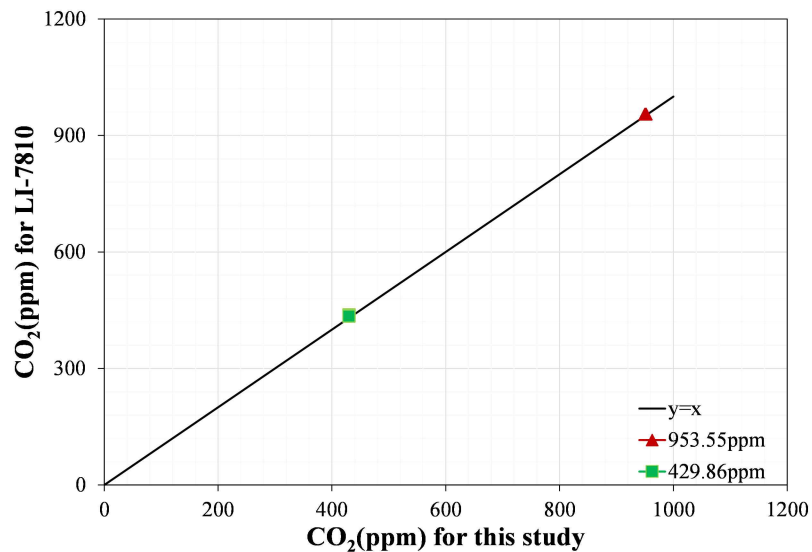


Fig. 26 Comparison of test results for LI-7810 and the analyzer developed in this study

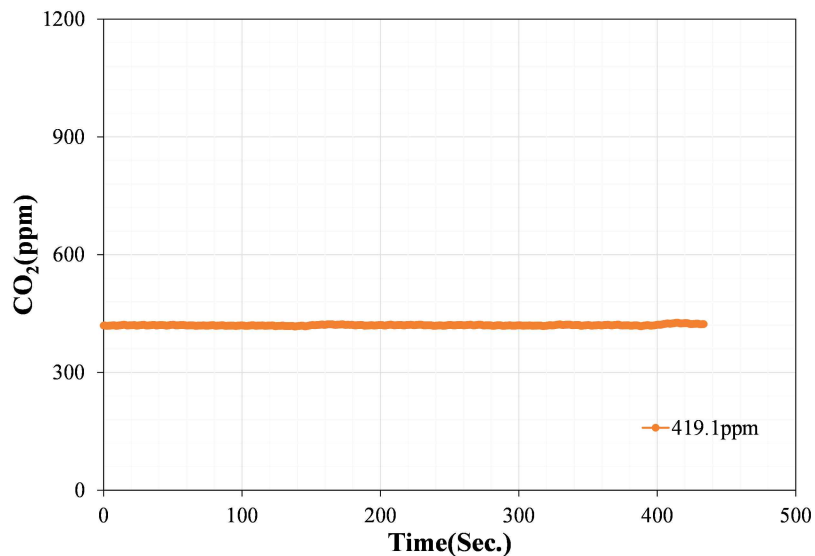


Fig. 27 Test results for analyzer developed(419.1ppm)

개발된 분석기에 대한 국내 검증은 기존 보정된 분석기를 이용하여 다른 표준가스 농도를 가진 CO₂ 가스로 시험하여 표준가스값이 나오는지 검증하였다. Fig. 27에 나타낸 바와 같이 CO₂ 농도가 419.1ppm인 표준가스에 대해 개발된 분석기에서 측정한 데이터는 거의 일치하는 농도값(420.327ppm)을 나타내고 있다. 따라서 CO₂ 분석기로서 충분한 가치가 있는 것으로 판단된다. 그러나 극지에서 활용시 저온에서도 작동여부에 대한 장기간(1년 이상) 추가 연구가 필요하며 이에 대한 연구를 추후 진행할 계획이다.

마. 대기 전력 분석 (Standby power consumption)

Fig. 28은 개발된 분석기가 대기 상태에서 소비하는 전류를 측정한 결과이다. 원격으로 분석기 동작을 활성화 시키면 계측기는 메인 제어기, 공기펌프를 제어하여 측정을 개시한다. 실

험 결과 활성화하여 제어 명령을 기다리는 동작에서의 최대 전류는 대략 7[mA], 휴지모드에 진입하여 최소의 전력을 소비할 때의 전류는 57[uA] 이다. 따라서 평균 전류는 167[uA]으로 목표값 2[mA] 초과 달성하였다.



Fig. 28 Average standby current analysis

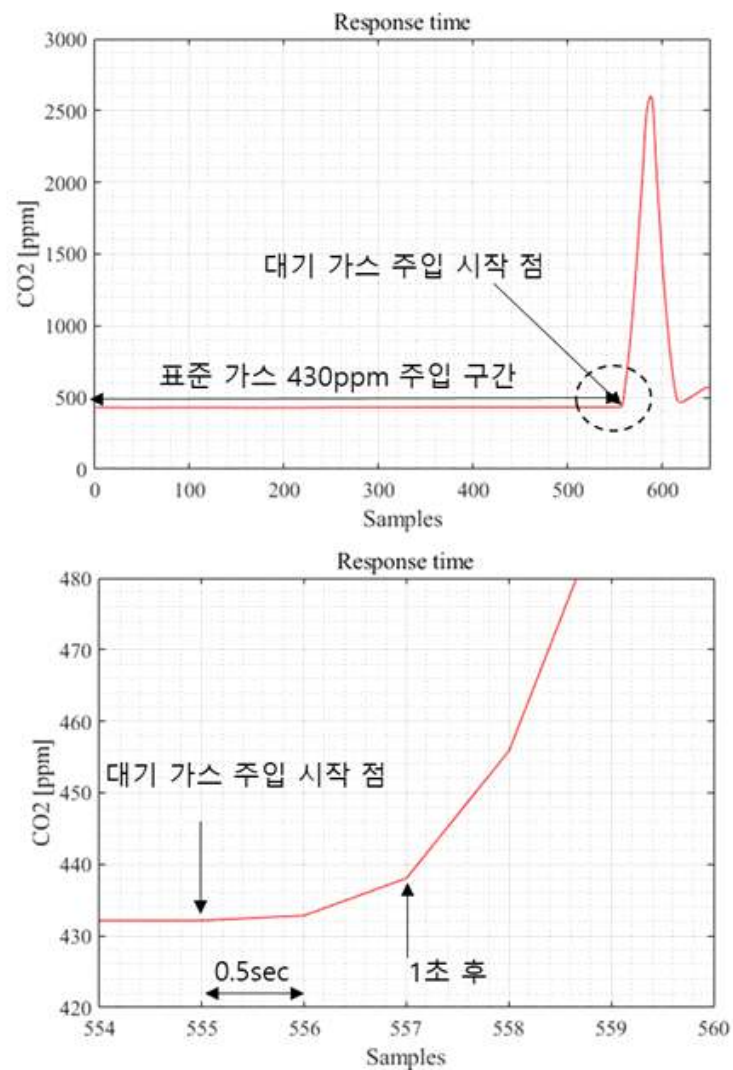


Fig. 29 Response time analysis

바. 응답 시간 분석 (Response time)

Fig. 29는 개발된 분석기에 주입되는 가스 농도에 따른 계측기의 반응 속도를 측정한 실험 결과이다. 표준가스 430ppm 주입하여 안정화 시간이 최소 500 샘플 지속되는 것을 확인하고, 대기 가스가 주입되도록 하였을 때의 시점으로부터 계측기 반응하는 데까지 걸리는 시간으로 확인하였으며 결과는 아래와 같이 1[sec] 반응하는 것을 확인하였다.

사. 업데이트 속도 분석 (Output rate)

Fig. 30은 개발된 분석기에 데이터를 저장하는 형식이며, 측정데이터가 업데이트되면 밀리초(millisecond) 단위로 저장하도록 하였다. 즉, 각 측정데이터가 업데이트되는 시간 간격이 분석기에서 데이터가 업데이트되는 속도이다. 이를 검증하기 위해서 4,800 샘플의 시간 간격을 산술 평균하였으며 결과는 Fig. 31과 같이 0.49955[sec]로 목표값 0.5 [sec]을 달성하였다.

	A	B	C
1	time	CO2	CO2(Filtered)
2	2025-02-06T14:22:59.541Z	430.0281	430.2204
3	2025-02-06T14:23:00.052Z	430.0248	430.2008
4	2025-02-06T14:23:00.548Z	430.0399	430.1847
5	2025-02-06T14:23:01.046Z	430.1063	430.1769
6	2025-02-06T14:23:01.540Z	430.0892	430.1681
7	2025-02-06T14:23:02.053Z	430.0298	430.1543
8	2025-02-06T14:23:02.552Z	429.9923	430.1381
9	2025-02-06T14:23:03.057Z	430.0159	430.1259
10	2025-02-06T14:23:03.555Z	429.9894	430.1122
11	2025-02-06T14:23:04.050Z	430.0403	430.105
12	2025-02-06T14:23:04.552Z	429.9821	430.0927
13	2025-02-06T14:23:05.051Z	429.9121	430.0747
14	2025-02-06T14:23:05.540Z	429.8303	430.0502
15	2025-02-06T14:23:06.048Z	429.7102	430.0162

Fig. 30 Logging Data

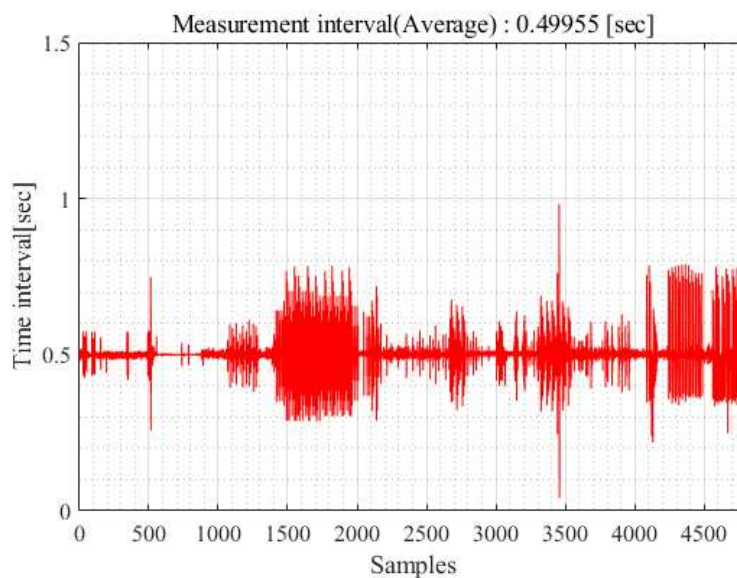


Fig. 31 Average value of measurement interval

정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 반복성(Repeatability), 응답 시간(Response Time), 영점 안정성(Zero Drift)에 대해 데이터로 검증하고 한국산업기술시험원에서의 평가 결과 CO₂ 표준가스에 대한 정확도에서 오차가 $\pm 1\%$ 미만의 값을 나타내고 있고, 정밀도에서 표준편차가 0.3을 평가 결과로 나타내고 있어 우수한 정확도와 정밀도를 가진 분석기를 개발한 것으로 판단된다. 또한 응답 시간은 개발된 분석기의 농도 데이터 저장 간격이 0.5초이므로 반응 시간이 좋다고 평가할 수 있다. 영점 안정성은 CO₂ 표준가스 0ppm에서의 값과 데이터를 평가한 결과 영점 안정성도 우수하게 평가할 수 있다. 마지막으로 선형성은 LI-7810 제품과 비교 결과 약 430, 950ppm에서 CO₂ 농도가 증가함에 따라 분석기의 측정값이 일정한 비율로 증가해서, 본 연구에서 개발한 분석기의 선형성이 우수하다고 할 수 있다. 따라서 개발된 분석기의 성능 수준이 LI-7810 제품과 동일하다고 제시할 수 있다. 특히 상용제품 대비 1/6의 금액으로 비분산 적외선 CO₂ 분석기의 개발로 광역에서 CO₂ 분석이 가능할 것으로 판단된다.



제 4 장 연구개발목표 달성도

제3장에서 실험 및 분석 결과 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 반복성(Repeatability), 응답 시간(Response Time), 영점 안정성(Zero Drift)에 대해 데이터로 검증하고 한국산업기술시험원에서의 평가 결과, 우수한 정확도와 정밀도를 가진 분석기를 개발한 것으로 판단된다. 따라서 개발된 분석기의 성능 수준을 다음과 같이 Table 4와 같이 제시할 수 있다. 특히 상용제품 대비 1/6의 금액으로 비분산 적외선 CO₂ 분석기의 개발로 광역에서 CO₂ 분석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 이를 이용한 특허 출원을 개발 목표 달성도를 100% 달성하였다.

Table 4 Performance levels of development analyzers

항목 (주요성능 Spec)	단위	상용화 제품 성능수준	개발 목표 성능수준	비고
Precision		—	<1	Std.dev.로 확인
Accuracy	%	± 1.5	± 1	measuring range
Operating temperature	℃	-20 ~ 45	-40 ~ 45	
Standby power consumption	mA	420	2	without pump
Response time	sec.	3.5	2	at 60 l/h (flow)
Output rate (Min.)	sec.	2	0.5	programmable

또한 개발된 비분산 적외선 CO₂ 분석기에 대해 특정 가스의 농도를 측정하는 시스템 및 방법에 관한 특허를 출원하였다. 특허는 광원 및 검출기 사이에 광 도파관을 배치하고, 광 도파관 내로 피측정 가스를 유입한 후 광 도파관 내부의 가스의 압력을 측정하여 제어부로 전송, 압축하여 피측정 가스 내의 타겟 가스의 농도를 정확하게 측정할 수 있도록 한 고정밀 가스 농도 측정 시스템 및 이를 이용한 가스 농도 측정 방법으로 기존 비분산 적외선 CO₂ 분석기에 비해 정확도를 더욱 높일 수 있는 특허를 출원하였다. 이에 대한 발명의 명칭은 ‘고정밀 가스 농도 측정 시스템 및 이를 이용한 가스 농도 측정 방법’이며 관련 자료를 부록에 수록하였다.

따라서 개발된 분석기는 정확도, 정밀도, 응답 시간, 대기시간 등에서 기존 상용화 제품 대비 높은 성능수준으로 개발되어 신뢰성 있는 절대 농도 측정, 높은 정확도, 샘플링 시스템의 일관성, 실시간 모니터링 시스템에서의 빠른 응답, 대기시간동안의 저전력 구동 등 연구 및 산업계에서 요구하는 환경변화에 따른 신뢰도 유지 및 장기 모니터링에 따른 실시간 감지, 장시간 연속 측정, 전기료 저감등에 대한 활용도가 클 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

CO₂ 분석기를 활용한 관측 거점 실증 연구는 기후변화 대응 및 온실가스 배출 저감을 위한 중요한 기반을 마련할 수 있다. CO₂ 농도의 정확한 측정과 실시간 모니터링을 통해, 국가적 기후 정책 및 환경 관리 전략을 수립할 수 있다. 본 연구에서 다룬 실증 결과와 향후 개선 방향은 CO₂ 분석기 기술의 발전과 함께, 보다 정교하고 효과적인 온실가스 모니터링 시스템 구축에 기여할 수 있을 것이다. 기기 성능 개선, 저비용, 빅데이터 기반 통합 시스템 구축 등은 향후 관측 네트워크의 효과성을 더욱 높일 수 있는 중요한 연구 주제이다.

- 가. 개발된 비분산 적외선 CO₂ 분석기는 상용제품 대비 저가의 장비이나 상용제품과 같은 성능을 지닌 것으로 성능 평가되어 CO₂ 농도를 포함한 대기질 정보를 실시간으로 모니터링할 수 있으며, 다양한 측정 지점에서 CO₂ 농도를 측정해 국가적 기후 정책 및 배출량 감소 전략을 세우는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 이러한 저가의 고정밀 CO₂ 분석기는 대기질 모니터링을 위한 핵심 도구로, 다양한 산업 및 연구 분야에서 활용될 수 있다. 특히, CO₂ 농도의 변화를 실시간으로 관측하고, 국가 및 지역 수준에서의 정책적 대응을 위한 데이터 기반을 마련하기 위한 관측 거점 실증은 매우 중요한 역할을 한다.
- 나. 국내의 대기업 및 연구기관에서는 산업 공정에서 배출되는 CO₂ 농도를 측정하고, CO₂ 저감을 위한 기술 개발에 활용하고 있다. 이들은 산업 현장의 CO₂ 모니터링을 통해 에너지 효율성 증대 및 온실가스 배출 저감 작업을 지속적으로 진행하고 있어 개발된 분석기의 활용성이 클 것으로 판단된다.
- 다. 개발된 비분산 적외선 CO₂ 분석기는 CO₂를 연중 모니터링할 수 있는 기초가 되었으며 동토의 활동층 광역적(여러 지역)으로 발원하는 CO₂에 대한 연중 관찰로 국가 인벤토리 보고서 (National Inventory Report; NIR)가 포함된 격년 투명성 보고서 (Biennial Transparency Report; BTR)에 제출하는 데이터의 불확도를 낮춰 CO₂ 배출량에 대한 산정 과정을 투명하게 제시될 수 있을 것으로 판단된다. 이는 전 지구 평균기온 상승에 따라 자연적 배출/흡수량의 변화가 커지면 CO₂ 배출량의 신뢰도는 큰 영향을 주기 때문이다. 지구 가열화의 영향으로 전 지구상에서 육상 빙하가 빠른 속도로 사라지고 있음을 감안할때, 빙하 후퇴 지역에서 빙하 후퇴 지역을 대상으로 남북극 혹은 전 지구적 온실가스 등의 비교 연구를 테마로 한 대형 R&D 사업화에 큰 밑거름이 될 것이다.
- 라. 앞으로의 연구는 더 정교한 센서 보정 알고리즘과 실시간 데이터 처리 기술의 발전을 통해, 보다 정확하고 신뢰성 높은 고정밀 CO₂ 센서 시스템을 구현할 수 있을 것이며 IoT 및 클라우드 기반 시스템을 통한 데이터 관리 및 분석의 도입으로 센서 기술의 활용 범위를 더욱 넓힐 수 있을 것으로 판단된다. 향후 연구/산업 현장에 상용화를 위해 경주할 것이며 이를 통해 가격 경쟁력 있는 CO₂ 분석기 보급을 늘릴 수 있을 것으로 판단된다.

제 6 장 참고문헌

Dweik, B. 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.

Esfahani, S. 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.

Hodgkinson J. and R. P. Tatam, “Optical gas sensing: a review”, Meas. Sci. Technol., Vol. 24, No. 1, pp. 012004 (1)-012004(59), 2012.

IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>, 2021a.

IPCC: Summary for Policymakers, in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 3 - 32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>, 2021b.

IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., and Rama, B., Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056, <https://doi.org/10.1017/9781009325844>, 2022.

IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Core Writing Team, Lee, H., and Romero, J., IPCC, Geneva, Switzerland., Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),

<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>, 2023a.

IPCC: Climate Change 2023: Summary for Policy Makers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Core Writing Team, Lee, H., and Romero, J., IPCC, Geneva, Switzerland., Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>, 2023b.

Jeong, Y. J. 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.

Liu, H. 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.

Maikala, R. V. “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.

Ministry of environment, Low price carbon monoxide NDIR gas sensor, 2009

Rose M. Cory, Byron C. Crump, Jason A. Dobkowski, and George W. Kling, Surface exposure to sunlight stimulates CO₂ release from permafrost soil carbon in the Arctic, *PNAS* February 26, 2013 110 (9) 3429–3434; <https://doi.org/10.1073/pnas.1214104110>.

Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schadel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C., & Vonk, J. E., 2015, Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520, 171 – 179.

Visco, G. 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.

Yi, S. H. “Infrared light absorbance: a new method for temperature compensation in nondispersive infrared CO₂ gas sensor”, *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 5, pp. 303–311, 2020.

Yoon, J J Lee, N Do, and D Jung, Optical waveguide structure design of Non-dispersive Infrared (NDIR) CO₂ gas sensor for high-sensitivity. Journal of sensor science and technology, vol. 30(5), p.331-. 2021. doi:10.46670/JSST.2021.30.5.331



시험 성적서

(TEST REPORT)



한국산업기술시험원
Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 25-005273-01-1
Report No.

페이지 (1) / (총 3)
Page of Pages



1. 의뢰자 (Client)

기관명 (Name) : 한국해양과학기술원 부설 극지연구소

주소 (Address) : 인천광역시 연수구 송도대로 26, 1층 (송도동, 한국해양과학기술원부설 극지연구소)

의뢰일자 (Date of Receipt) : 2025. 01. 22.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : -

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)

제품명 (Description) : 온실가스(CO2) 관측장비 성능시험

제조회사 (Manufacturer) : 극지연구소

모델명 (Model Name) : KP-CO2-V1000-R00

제조번호 (Serial Number) : KPE24310CO2V1000R00

기타 (Remark) :

4. 시험기간 (Date of Test) : 2025년 02월 06일 ~ 2025년 02월 06일

5. 시험장소 (Location of Test) :

☐ KTL 고정시험실

☒ 현장시험 (주소 : 서울 관악구 관악로 1 서울대학교 220동 종합교육연구동, 211호)

6. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 시험결과 참조

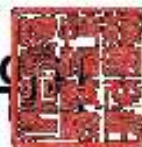
7. 시험결과 (Test Results) : 시험결과 참조

- 비고(Note) : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 한하며, 별첨 및 기타본격의 근거 등으로의 사용을 금합니다.
2. 이 성적서는 원본만 유효하며, 임의로 재 가공된 사본 및 전자인쇄본 등은 유효하지 않습니다.
(원본이란 KTL에서 발행한 결과에 따라 보안성을 포함시켜 제공하는 모든 성적서를 의미합니다.)
3. 아래의 QR코드를 스캔하여 성적서의 원본내용 확인이 가능하며, KTL 보관 원본과 동일성은 고객진흥용페이지(customer.ktl.re.kr)의 '성적서 원본확인' 중에서 비교가 가능합니다.
4. 본 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 표준 및 KOLAS 인정과 관련이 없습니다.

화 인 Affirmation	작성자(Tested by)	기술책임자(Technical Manager)
	성명(Name): 최재훈 (Signature)	성명(Name): 배운경 (Signature)

2025. 02. 11.

한국산업기술시험원



경기도 안산시 상록구 해안로 723(728, Haean-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, KOREA) Tel.031-500-0217 Fax. 031-500-0309

시험결과(Test Results)

1. 일반 사항

제 품 명 : 온실가스(CO₂) 관측장비 성능시험
 제 작 회 사 : 극지연구소
 모 델 명 : KP-CO₂-V1000-R00
 제 조 번 호 : KPE24310CO₂V1000R00
 시 험 환 경 : 온도 (22.5 ± 0.5) °C, 습도 (42 ± 2) % R.H.

2. 사용한 표준장비 명세

사용장비명	제작회사 및 형식	기기번호	유효기간	교정(시험)기관
Description	Manufacturer and Model	Serial Number	Expiration date	Calibration Laboratory
표준가스(CO ₂)	KRISS / 429.86 μmol/mol(*)	D170221	2028. 03. 11.	KRISS
표준가스(CO ₂)	KRISS / 953.55 μmol/mol	D133611	2028. 03. 11.	KRISS

* 1 μmol/mol = 1 ppm

3. 시험방법

3.1 표준가스를 주입 후 안정화가 되면 10 회 반복하여 (지시)평균값을 구한다.

3.2 표준편차를 산출한다.

※ 유량조건 : 0.5 L/min

4. 시험결과

4.1 가스농도(CO ₂)		단위 : $\mu\text{mol/mol}$
표준값	(지시)평균값	표준편차
429.86	430.58	0.148
953.55	957.74	0.404

* 안정화 시간 : 약 10분

4.2 제품사진



TEST REPORT



Report No. : 25-005273-02-1

Page of Pages : (1) / (3)



1. Client

Name : Korea Polar Research Institute, Division of Ocean & Atmosphere Sciences

Address : 26, Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 21990, Republic of Korea

Date of Receipt : 2025. 01. 22.

2. Use of Report : -

3. Test Sample

Description : Greenhouse gas(CO2) measurement equipment performance test

Manufacturer : KOPRI

Model Name : KP-CO2-V1000-R00

Serial Number : KPE24310CO2V1000R00

Remark : This test report is a 25-005273-01-1 English report.

4. Date of Test : 2025. 02. 06. ~ 2025. 02. 06.

5. Location of Test :

☐ KTL Permanent Test Lab

☒ On Site Testing

(Address : 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Republic of Korea, Comprehensive Education Research Building(220 Dong), Room 211)

6. Test Standard/Method : Refer to attached results

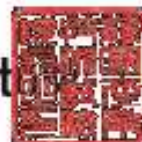
7. Test Results : Refer to attached results

- Note : 1. This report is limited to samples submitted by the applicant and is prohibited from being used for legal or other reasons of dispute.
2. This document is valid only in its original document, and any reproduced copies and electronic copies are not valid. ("Original" means all the reports provided by the KTL including the security procedures.)
3. You can check the contents of the report by scanning the 2D Barcode below. The identity of original reports can be checked in the "Confirm original report" window of the customer's homepage (customer.ktl.re.kr).
4. This report is not related to KS Q ISO/IEC 17025 & KOLAS Accreditation.

Affirmation	Tested by		Technical Manager	
	Name : CHOI JAE HOON		Name : Bae Yun Kyung	

2025. 02. 11.

Korea Testing Laboratory



723, Haeon-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, KOREA Tel.+82-31-500-0217 Fax. +82-31-500-0389

Test Results

1. General details

Description : Greenhouse gas(CO₂) measurement equipment performance test
 Manufacturer : KOPRI
 Model names : KP-CO₂-V1000-R00
 Serial Number : KPE24310CO2V1000R00
 Test environment : Temperature (22.5 ± 0.3) °C, Humidity (42 ± 2) % R.H.

2. Specification of standard equipment used

Description	Manufacturer and Model	Serial Number	Expiration date	Calibration Laboratory
Std Gas(CO ₂)	KRISS / 429.86 μmol/mol(*)	D170221	2028. 03. 11.	KRISS
Std Gas(CO ₂)	KRISS / 953.55 μmol/mol	D133611	2028. 03. 11.	KRISS

* 1 μmol/mol = 1 ppm

3. Test method procedure

3.1 After stabilization by injecting the standard gas, repeat the measurement 10 times and obtain the average value.

3.2 Calculate the standard deviation.

※ Flow conditions : 0.5 L/min

4. Test results

4.1 Gas concentration(CO ₂)		Unit : $\mu\text{mol/mol}$
Standard value	(Indicative) average value	Standard deviation
429.86	430.58	0.148
953.55	957.74	0.404

* Stabilization time : approximately 10 minutes

4.2 Product photos and test scenes



End.

관인생략

출원번호통지서

출원일자 2024.12.27
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(DP24376)
출원번호 10-2024-0198651 (접수번호 1-1-2024-1450324-10)
(DAS접근코드403A)
출원인명칭 한국해양과학기술원(1-2012-034461-6)
대리인성명 오위환(9-2001-000083-1)
발명자성명 박근보
발명의명칭 고정밀 가스 농도 측정 시스템 및 이를 이용한 가스 농도 측정 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 이용하여 특허로
홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 통보된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가
까운 은행 또는 우체국에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(검정) 정정신고서]를 제출하
여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
4. 기타 심사 절차(제도)에 관한 사항은 특허청 홈페이지를 참고하시거나 특허고객상담센터(☎ 1544-8080)에
문의하여 주시기 바랍니다.
※ 심사제도 안내 : <https://www.kipo.go.kr>-지식재산제도

뒷 면

(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 연구정책지원사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 연구정책지원사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.