

박사학위논문

1654nm 단적외선 파장을 이용한
미니플랫타입 휴대형 레이저
메탄누출검지장비 개발

2025년

한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합건설팅학과

스마트융합건설팅전공

백 영 삼

박 사 학 위 논 문
지도교수 홍정완

1654nm 단적외선 파장을 이용한
미니플랫타입 휴대형 레이저
메탄누출검지장비 개발

Development of mini flat type portable laser methane leak
detection device using a 1654nm short infrared wavelength

2024년 12월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합건설팅학과

스마트융합건설팅전공

백 영 삼

박 사 학 위 논 문
지도교수 홍정완

1654nm 단적외선 파장을 이용한
미니플랫타입 휴대형 레이저
메탄누출검지장비 개발

Development of mini flat type portable laser methane leak
detection device using a 1654nm short infrared wavelength

위 논문을 컨설팅학 박사학위 논문으로 제출함

2024년 12월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합컨설팅학과

스마트융합컨설팅전공

백 영 삼

백영삼의 컨설팅학 박사학위 논문을 인준함

2024년 12월 일

심사위원장 박 인 채 (인)

심 사 위 원 윤 주 일 (인)

심 사 위 원 김 현 중 (인)

심 사 위 원 신 채 상 (인)

심 사 위 원 홍 정 완 (인)

국 문 초 록

1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫타입 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 개발

한 성 대 학 교 대 학 원
스 마 트 융 합 컨 설 텅 학 과
스 마 트 융 합 컨 설 텅 전 공
백 영 삼

본 연구는 1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫타입 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 개발에 관한 것이다. 전 세계적으로 천연가스 사용량 급증과 함께 관련 사고가 빈번히 발생하고 있어, 원거리에서 효과적으로 메탄누출을 검지할 수 있는 장비의 필요성이 대두되고 있다. 특히 기존의 근거리 검지 방식으로는 대규모 시설이나 접근이 어려운 지역에서의 누출 감지에 한계가 있어, 원거리 검지가 가능한 새로운 기술 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 먼저 적외선의 특성과 메탄가스의 광학적 특성을 분석하고, Beer-Lambert 법칙을 기반으로 한 메탄가스 누출검지 방법을 고찰하였다. 또한, 기존의 메탄가스 누출검사 방법과 TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 기술에 대한 선행연구를 수행하였다. 이를 바탕으로 미니플랫타입 소형화 메탄누출검지장비 개발을 위한 세부 기술들을 연구

하였다.

주요 개발 내용으로는 첫째, 미니플랫 타입 레이저 다이오드를 개발하였다. 기존의 버티플라이 타입에 비해 크기와 무게를 대폭 줄이면서도 안정적인 성능을 확보하였다. 둘째, 프레즈넬 렌즈 기술을 적용하여 광학렌즈를 소형화하였다. 이를 통해 장비의 크기를 줄이고 휴대성을 향상시켰다. 셋째, 고성능 광학필터를 설계 제작하여 측정의 정확도를 높였다. 넷째, 메탄검지 회로 및 제어시스템을 최적화하여 안정적인 동작과 높은 감도를 실현하였다.

이러한 요소 기술들을 통합하여 최종적으로 미니플랫타입 휴대형 레이저 메탄누출검지장비를 구성하였다. 개발된 장비는 30m 이상의 거리에서 메탄 누출을 감지할 수 있으며, 기존 장비들에 비해 크기와 무게가 크게 줄어 현장에서의 사용이 용이하다.

개발된 장비의 성능을 검증하기 위해 공인시험기관 시험과 함께 다양한 실험을 수행하였다. 거리별 측정값, 농도별 측정 성능시험을 하였으며 기존 상용 제품과의 비교 실험에서도 동등 이상의 성능을 보여주었다.

본 연구를 통해 개발된 미니플랫타입 휴대형 레이저 메탄누출검지장비는 도시가스 공급과 사용 시설의 안전성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이는 안전사고 예방은 물론, 에너지 효율 향상, 환경 보호, 경제적 손실 감소 등 다양한 측면에서 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

향후 연구 방향으로는 첫째, 다양한 환경 조건(온도, 습도, 풍속 등)에서 실증 테스트를 통해 제품의 안정성과 신뢰성을 향상하고자 한다. 둘째, 인공지능 기술을 접목하여 가스 누출 패턴 분석 및 예측 기능을 추가하는 연구를 진행할 예정이다. 셋째, 메탄 이외의 다른 가연성 가스나 유해 가스 검출로 기능을 확장하는 연구도 수행할 계획이다.

본 연구는 첨단 광학 기술과 센싱기술의 융합을 통해 원거리에서도 신속하고 효과적으로 가스 누출을 감지할 수 있는 솔루션을 제시했다는 점에서 의의가 있다. 향후 지속적인 연구 개발을 통해 더욱 안전하고 효율적인 에너지 인프라 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

【주요어】 1654nm, 미니플랫, 원거리, 레이저, 가스누출.

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목적	1
제 2 절 연구의 필요성	3
제 2 장 이론적 배경 및 선행연구	5
제 1 절 적외선의 특징	5
제 2 절 메탄가스의 광학적 특성	9
제 3 절 Beer-Lamber 법칙에 근거한 메탄가스 누출검지 방법	11
제 4 절 선행연구	14
제 3 장 Mini Flat type 소형화 메탄누출검지장비 개발	38
제 1 절 메탄누출검지장비의 구성 및 개발 프로세스	38
제 2 절 Mini Flat type 레이저 다이오드 개발	42
제 3 절 Fresnel Lens 개발(광학렌즈 소형화)	59
제 4 절 광학필터 설계 제작	65
제 5 절 메탄검지 회로 및 제어시스템 설계	71
제 6 절 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 구성	90
제 4 장 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 실험방법 및 실험결과	100
제 1 절 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 실험방법	100
제 2 절 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 실험결과	107
제 5 장 결 론	114
참 고 문 헌	116
Appendix	121

ABSTRACT	127
----------------	-----

표 목 차

[표 2-1] 적외선 유형에 따른 파장, 용도와 특징	6
[표 2-2] 적외선의 주요 특징	7
[표 2-3] 근거리 측정 센서방식	14
[표 2-4] LD와 LED의 특성과 차이점	25
[표 3-1] 주요 구성요소	38
[표 3-2] 개발 프로세스 내용	40
[표 3-3] 개발 다이오드와 기존 기술과의 비교	44
[표 3-4] 렌즈의 종류와 특성	62
[표 3-5] Rx 수신 최종 signal 특성	79
[표 4-1] 공인시험성능평가	107
[표 4-2] 개발제품_거리대비 농도 측정값	108
[표 4-3] T사 제품_거리대비 농도 측정값	108
[표 4-4] 세 가지 농도측정에 따른 거리별 농도변화	110
[표 4-5] 농도에 따른 최대 측정거리	112

그 립 목 차

[그림 2-1] 전자기파 스펙트럼 도식	5
[그림 2-2] 대상물질에 따른 흡수파장대	9
[그림 2-3] 1654nm 메탄 흡수파장	9
[그림 2-4] Beer-Lambert 법칙의 도식화	11
[그림 2-5] Open Path Gas Detector 측정원리	15
[그림 2-6] 파장흡수스펙트럼	15
[그림 2-7] LIDAR 방식 측정원리	16
[그림 2-8] 열화상 측정장비 디스플레이 화면	17
[그림 2-9] 테라헤르츠 측정영역	18
[그림 2-10] 테라헤르츠 측정원리	19
[그림 2-11] NASA 화성 생물체 탐사기술에 적용	20
[그림 2-12] 초기 미국산 제품 및 특징	21
[그림 2-13] 초기 일본산 제품 및 특징	22
[그림 2-14] 레이저의 특성	23
[그림 2-15] 제조된 레이저 다이오드 칩	28
[그림 2-16] INPD 설계 제작 (M-PD제작 단계)	29
[그림 2-17] TEC Control 소자 버터플라이 내부에 장착	29
[그림 2-18] 광 발산렌즈 설계제작	30
[그림 2-19] 최종 완성된 패키지 하우징 설계도	31
[그림 2-20] 메타렌즈와 볼록렌즈의 두께와 무게 비교	33
[그림 2-21] 볼록렌즈 개념도와 설계도	34
[그림 2-22] 볼록렌즈 조립도	34
[그림 2-23] 완성된 광학렌즈(볼록렌즈)	35
[그림 2-24] 레이저 메탄검지기용 간섭필터 예시	37
[그림 3-1] 개발 프로세스 진행도	39
[그림 3-2] 레이저 다이오드 기술분류	42
[그림 3-3] 칩 구조에 따른 분류	42
[그림 3-4] 광검출 스펙트럼 반응	45

[그림 3-5] 측정값(左), Responsivity 보정(右)한 ILV그래프	46
[그림 3-6] LD Chip TEM 분석 자료	47
[그림 3-7] LD CHIP [웨이퍼(WAFER)]	47
[그림 3-8] 평행광 렌즈 도면	48
[그림 3-9] 평행광 렌즈 3D 시뮬레이션	48
[그림 3-10] 평행광 렌즈	49
[그림 3-11] 열전소자 도면	50
[그림 3-12] 열전소자 3D 시뮬레이션	50
[그림 3-13] 열전소자	51
[그림 3-14] 열전소자 방열판과 보조팬	51
[그림 3-15] 파장 측정용 필터 도면	51
[그림 3-16] 파장 측정용 필터	52
[그림 3-17] 파장 안정화 블록으로 측정된 파장 그래프	53
[그림 3-18] 파장 안정화 블록으로 측정한 mPD1/mPD2 비율	53
[그림 3-19] 빔스플리터	54
[그림 3-20] 모니터 PD	55
[그림 3-21] 반도체 레이저 다이오드 패키지 구조	55
[그림 3-22] 광원패키지 하우징 도면	56
[그림 3-23] 광원패키지 하우징용 실링캡	57
[그림 3-24] 광원패키지 하우징	57
[그림 3-25] 완성된 Laser Diode	58
[그림 3-26] 장착된 Laser Diode	58
[그림 3-27] 볼록렌즈→ 프레즈넬 렌즈(평면렌즈)로 변경	59
[그림 3-28] 볼록렌즈와 프레즈넬 렌즈의 차이	59
[그림 3-29] 프레즈넬 렌즈 정면과 측면	60
[그림 3-30] 구면렌즈와 프레즈넬 렌즈의 두께차이	61
[그림 3-31] 두 종류 프레즈넬 렌즈 제작	61
[그림 3-32] OLY IR5 재료의 측정 파장대 및 투과율 그래프	63
[그림 3-33] 렌즈 구경이 같고 초점거리가 다른 경우	64

[그림 3-34] 프레즈넬 렌즈 설계 및 제작	64
[그림 3-35] 중심 파장과 Full Width at Half Maximum 도해	66
[그림 3-36] 차단범위 도해	66
[그림 3-37] NBPF 1654 설계에 따른 투과율 70% 측정데이터	67
[그림 3-38] NBPF 1654 설계에 따른 투과율	67
[그림 3-39] NBPF 1654 설계비교	68
[그림 3-40] 필터 측정 그래프 $1654 \pm 2\text{nm}$ Dia 12mm	69
[그림 3-41] 필터 측정 그래프 $1654 \pm 2\text{nm}$ Dia 9mm	70
[그림 3-42] 광학필터 제작	70
[그림 3-43] Tx 구동 회로	72
[그림 3-44] Tx 구동 회로 PCB	72
[그림 3-45] Rx 신호 처리 회로도	73
[그림 3-46] 셋업 지그 테스트	74
[그림 3-47] LD 구동 연결	75
[그림 3-48] 미니플랫 LD 구동 연결 보드	76
[그림 3-49] LD 구동 보드 출력 특성	77
[그림 3-50] Rx 수신 1차 / 2차 증폭 수신 특성	78
[그림 3-51] MCU 연결 회로도	80
[그림 3-52] 메탄검지 측정 송수신시스템 회로부	81
[그림 3-53] 가스 센싱을 위한 기본 개요	82
[그림 3-54] 광학적 $2f$ 발생을 위한 개념도	82
[그림 3-55] 레이저 드라이버와 5축 정렬 장비 파장 측정 셋업	83
[그림 3-56] 레이저 파워 측정 및 프로그램 로딩용 셋업	83
[그림 3-57] 프로그램 전압, 온도 셋업	84
[그림 3-58] 노이즈 소스 원인 분석	84
[그림 3-59] 변경한 BOM 일부	85
[그림 3-60] Low-Jitter Design	86
[그림 3-61] 안정적인 Sine Wave 출력	87
[그림 3-62] LD보드의 거버 파일(左)와 테스트용 PCB(右)	87

[그림 3-63] 필터 사용전(左)와 사용 후(右)	88
[그림 3-64] LD, PD 파형 테스트	88
[그림 3-65] 가스농도에 따른 파형의 변화	89
[그림 3-66] 레이저 메탄누출 검지기의 구성	90
[그림 3-67] 레이저 메탄누출 검지기 블록 다이어그램	91
[그림 3-68] 수광부 광학렌즈	91
[그림 3-69] 레이저 다이오드 탑재형상	92
[그림 3-70] Mini Flat type Laser Diode	93
[그림 3-71] 레이저 다이오드 제어회로	93
[그림 3-72] 필터 회로부	94
[그림 3-73] Lock-In Amplifier	94
[그림 3-74] ADC 칩	95
[그림 3-75] 자이링스 FPGA 칩	95
[그림 3-76] PCB 부품실장	96
[그림 3-77] 외형 케이스 Layout image 도면	97
[그림 3-78] 외형 케이스 assembly drawing	97
[그림 3-79] 목업, 사출물	98
[그림 3-80] 아트웍 설계(左)와 부품실장 PCB(右)	98
[그림 3-81] 개발 제품 내부	99
[그림 3-82] 상용화 개발제품	99
[그림 4-1] 유량계 활용 가스검지 테스트	101
[그림 4-2] TDLAS 센서를 사용한 측정 예시	103
[그림 4-3] 경로측정의 예	104
[그림 4-4] 외부환경 가스누출 테스트 현장	104
[그림 4-5] 1250ppm-m TEDLAR BAG	106
[그림 4-6] 두 제품의 비교 측정 결과	109
[그림 4-7] 세 가지 농도측정에 따른 거리별 측정결과	110
[그림 4-8] 농도에 따른 최대 측정거리	112

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

천연가스의 사용량이 전 세계적으로 증가하면서, 메탄누출로 인한 안전사고와 환경 문제가 중요한 이슈로 대두되고 있다. 특히 국내의 경우 천연가스 사용량이 2031년까지 연간 0.8%씩 증가할 것으로 예상되며, 이에 따라 안전사고 예방의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 메탄은 이산화탄소보다 28배나 높은 온실 효과를 초래하므로, 누출 시 환경에 미치는 영향이 매우 크다.

기존의 메탄누출 감지 방법들은 주로 근거리에서만 감지가 가능하거나, 원거리 감지가 가능하더라도 크고 무거워 휴대성이 떨어지는 문제점이 있었다. 이러한 한계로 인해 넓은 면적의 시설이나 접근이 어려운 지역에서의 효과적인 메탄누출 감지에 어려움이 있었다. 특히 대규모 천연가스 시설, 파이프라인, 저장탱크 등에서의 누출 감지는 기존 장비로는 효율적인 모니터링이 어려웠다. 또한, 도시가스 공급망이나 산업 단지 등 복잡한 환경에서의 메탄누출 감지도 큰 과제로 남아있었다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫타입 휴대형 레이저 메탄누출 감지 장비를 개발하고자 한다. 이 장비는 30m 이상의 거리에서 메탄누출을 감지할 수 있는 원거리 휴대형 시스템으로, 레이저 기반 흡수 분광분석법의 원리를 적용한다. 이 기술은 높은 감도와 선택성을 제공하며, 실시간으로 메탄 농도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한, 미니플랫타입 설계를 통해 장비의 크기와 무게를 대폭 줄여 현장에서의 사용 편의성을 크게 향상시켰다. 연구의 주요 목표는 다음과 같다.

- 1) 30m 이상 거리에서 메탄누출을 감지할 수 있는 고감도 센서 개발
- 2) 미니플랫타입 설계를 통한 장비의 소형화 및 휴대성 향상
- 3) 1654nm 단적외선 파장을 이용한 고정밀 메탄 검출 기술 구현
- 4) 실시간 모니터링 및 데이터 처리 시스템 개발

본 연구의 독창성은 1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫타입 설계에 있다. 이를 통해 기존 장비들의 한계를 극복하고, 높은 휴대성과 효율성을 동시에 갖춘 메탄누출 감지 장비를 개발하였다. 본 연구에서는 레이저 다이오드 개발, 광학렌즈 소형화, 광학필터 개발, 메탄감지 회로 및 제어시스템 설계 등의 요소 기술 개발을 진행한 후, 이를 통합하여 최종 장비를 구성하고 성능을 평가하였다. 특히, 미니플랫타입 레이저 다이오드의 개발은 장비의 소형화와 성능 향상에 크게 기여하였다. 또한, 프레즈넬 렌즈 기술을 적용한 광학 시스템 설계로 장비의 크기를 줄이면서도 높은 광학 성능을 유지할 수 있었다. 고성능 광학 필터의 개발과 최적화된 메탄 감지 회로설계는 장비의 정확도와 신뢰성을 크게 향상시켰다.

본 연구를 통해 개발된 장비는 천연가스 시설의 안전성을 크게 향상시키고, 메탄누출로 인한 환경 문제를 효과적으로 예방할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 에너지 산업의 안전성 향상과 환경 보호에 이바지함으로써 사회적, 경제적으로 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

제 2 절 연구의 필요성

본 연구의 필요성은 안전, 환경, 경제, 기술적 측면에서 다각도로 설명될 수 있다.

첫째, 안전 측면에서 본 연구의 필요성이 매우 높다. 천연가스 사용량 증가에 따라 누출 사고의 위험성도 증가하고 있다. 특히 최근 인천 LNG 저장 탱크 누출 사고(2017년 11월)와 같은 대형 사고는 천연가스 안전관리의 중요성을 다시 한번 상기시켰다. 또한 중대 재해 처벌에 관한 법률 시행으로 안전에 대한 요구가 더욱 높아지고 있다. 본 연구를 통해 개발되는 원거리 메탄누출 검지 장비는 이러한 안전 요구를 충족시키는 데 크게 이바지할 수 있다.

둘째, 환경적 측면에서 메탄누출 감지의 중요성이 강조되고 있다. 메탄은 강력한 온실가스로, 누출 시 지구온난화 가속화에 큰 영향을 미친다. 따라서 메탄가스 누출을 효과적으로 감지하고 관리하는 것은 기후변화 대응 정책의 중요한 부분이라고 할 수 있다. 본 연구에서 개발하는 장비는 원거리에서 정확하게 메탄누출을 감지할 수 있어, 환경 보호에 크게 이바지할 수 있다.

셋째, 경제적 측면에서 본 연구의 필요성이 있다. 천연가스 누출은 에너지 자원의 낭비를 의미한다. 특히 에너지 수입 의존도가 높은 우리나라의 경우, 이러한 누출로 인한 경제적 손실이 크다. 또한 누출 사고로 인한 시설 파괴, 인명 피해 등의 이차적 경제 손실도 막대하다. 본 연구를 통해 개발되는 장비는 이러한 경제적 손실을 줄이는 데 이바지할 수 있다.

넷째, 기술적 측면에서 본 연구에서는 기존 기술의 한계를 극복하는 새로운 접근 방식을 제시한다. 기존의 근거리 검지 방식이나 크고 무거운 원거리 검지 장비들의 한계를 극복하고, 1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫 타입 설계를 통해 높은 휴대성과 효율성을 동시에 갖춘 장비를 개발하였다. 이는 메탄누출 검지 기술의 새로운 패러다임을 제시할 수 있는 혁신적인 접근이다.

본 연구의 결과물은 다양한 분야에 응용될 수 있다. 천연가스 생산 및 저

장 시설, 파이프라인, 도시가스 공급망 등의 안전관리에 활용될 수 있으며, 환경 모니터링, 산업 안전 분야 등에도 적용할 수 있다. 또한 개발된 기술은 다른 가스 검지 시스템에도 응용될 수 있어, 관련 산업 발전에 이바지할 수 있다.

국내·외 연구 동향과 비교했을 때, 본 연구는 미니플랫타입 설계를 통한 소형화와 1654nm 파장 사용이라는 측면에서 차별성을 가진다. 이는 기존 장비들의 한계를 극복하고 실용성을 크게 향상시킬 수 있는 접근이다.

정책적 측면에서도 본 연구의 필요성이 강조된다. 정부의 에너지 안전 정책, 온실가스 감축 정책 등과 맞물려 메탄누출 감지의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 본 연구의 결과물은 이러한 정책 목표 달성에 이바지할 수 있다.

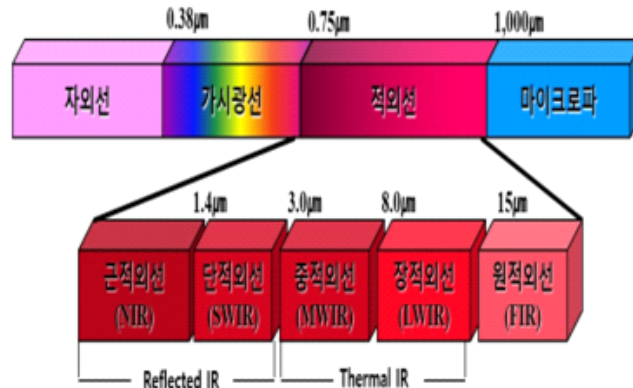
종합적으로, 본 연구는 안전, 환경, 경제, 기술적 측면에서 높은 필요성을 가지며, 그 결과물은 다양한 분야에 적용되어 큰 파급 효과를 가져올 것으로 기대된다.

제 2 장 이론적 배경 및 선행연구

제 1 절 적외선의 특징

태양의 빛은 [그림 2-1]에서 보는 것처럼 크게 가시광선, 자외선, 적외선으로 분류한다.

눈으로 볼 수 있는 색을 갖는 가시광선과 눈으로 볼 수 없는 자외선과 적외선이 있다. 적외선은 일반적으로 물체의 절대온도에 반비례하며, 최대 발광 파장을 갖는 빈의 변위법칙¹⁾을 따른 열 적외선 방사도에 따라서 근적외선, 단파장 적외선, 중간 적외선, 장파장 적외선, 원적외선으로 나눈다.(정용택, 2014)



[그림 2-1] 전자기파 스펙트럼 도식

전자기파 스펙트럼에서 적외선은 [그림 2-1]과 같이 $0.75\mu\text{m} \sim 1,000\mu\text{m}$ 파장 영역에 해당하며, 적외선의 응용 목적에 따라서 $0.75 \sim 1.4\mu\text{m}$ 대역은 근적외선(Near Infrared: NIR), $1.4 \sim 3.0\mu\text{m}$ 대역은 단적외선(Short Wavelength

1) 빈의 변위법칙[—變位法則, Wien's displacement law]: 물체의 온도와 물체가 방출하는 빛의 최대에너지 파장은 서로 반비례한다. 따라서 물체의 온도가 높으면 최대에너지의 파장이 짧아진다.

Infrared: SWIR), 3.0~8.0 μm 대역은 중적외선(Middle Wavelength Infrared: MWIR), 8.0~14 μm 대역은 장적외선(Long Wavelength Infrared: LWIR), 그리고 15 μm 보다 긴 파장 대역은 원적외선(Far Infrared: FIR) 등 5개 영역으로 구분할 수 있다. NIR과 SWIR 영역은 온도가 매우 높은 고온 영역에 해당하여 1,000 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도 측정에 사용되며, 영상 획득을 할 때는 반사되어 오는 적외선을 이용하기 때문에 반사형 적외선(Reflected Infrared)이라 한다. 그리고 MWIR과 SWIR은 상온에서 1,000 $^{\circ}\text{C}$ 이하의 온도 측정에 사용된다. 영상 획득을 할 때는 물체의 온도에 의해 스스로 복사하는 적외선을 이용하기 때문에 열형 적외선(Thermal Infrared)이라 한다.(정용택, 2019)

[표 2-1]은 적외선의 유형에 따른 파장, 용도와 특징에 대해 정리하였다.(김희연 외, 2014)

[표 2-1] 적외선 유형에 따른 파장, 용도와 특징

적외선 유형	파장(μm)	용도 및 특징
근적외선(NIR)	0.75 - 1.4	광섬유 통신, 나이트 비전 고글
단파장 적외선(SWIR)	1.4 - 3	장거리 통신 주요 스펙트럼
중파 적외선(MWIR)	3 - 8	유도 미사일 기술, 제트 엔진 적외선 특성 및 배기 가스 탐지
장파장 적외선(LWIR)	8 - 15	열 화상 영역
원적외선(FIR)	15 - 1,000	높은 온도 물체 방사, 실온 20 $^{\circ}\text{C}$ 의 물체가 방출하는 적외선 피크 파장 약 10 μm

[표 2-2]는 적외선의 주요 특징에 대하여 정리하였다.(정보통신기술용어해설, 2024)

[표 2-2] 적외선의 주요 특징

열 방출 특성	모든 물체는 절대온도 0K(-273.15℃) 이상에서 적외선을 방출한다. 이는 물체의 온도와 밀접한 관련이 있으며, 온도가 높을수록 더 많은 적외선을 방출한다. 이러한 특성은 열화상 카메라와 같은 비접촉식 온도 측정 장비의 기본 원리가 된다.
투과 및 흡수 특성	적외선은 가시광선이 통과하지 못하는 일부 물질을 통과할 수 있다. 예를 들어, 일부 플라스틱이나 얇은 직물은 적외선을 투과시킨다. 반면, 물, 이산화탄소, 메탄과 같은 특정 기체들은 특정 파장의 적외선을 강하게 흡수한다. 이러한 특성은 가스 검출 및 분석에 활용된다.
대기 투과 특성	적외선은 대기 중의 수증기, 이산화탄소 등에 의해 흡수되는데, 이로 인해 특정 파장대역에서 대기 투과율이 높은 '대기의 창'이 형성된다. 주요 대기의 창은 3-5 μ m(MWIR)와 8-14 μ m(LWIR) 영역에 있으며, 이 영역들은 열화상 장비나 가스 검출기 등에서 주로 활용된다.
반사 특성	적외선은 가시광선과 마찬가지로 반사될 수 있다. 금속 표면은 적외선을 잘 반사하는 반면, 거친 표면이나 유기물질은 적외선을 잘 흡수한다. 이러한 특성은 적외선 광학 시스템 설계에 중요하게 고려된다.
분광 특성	각 물질은 고유한 적외선 흡수 스펙트럼을 가지고 있어, 이를 통해 물질의 구조와 조성을 분석할 수 있다. 이는 분광분석법의 기초가 되며, 특히 메탄과 같은 가스의 검출에 중요하게 활용된다.

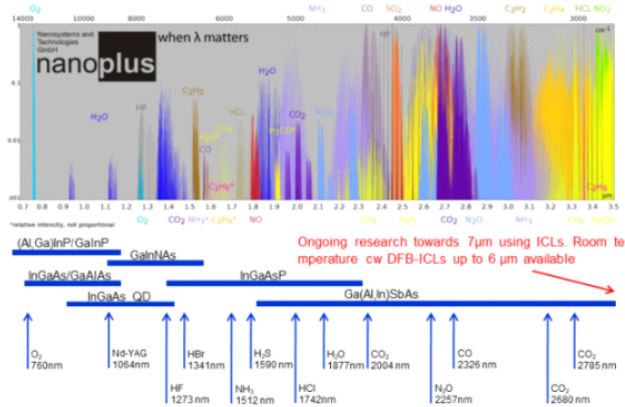
낮은 산란 특성	적외선은 가시광선에 비해 파장이 길어 대기 중의 입자에 의한 산란이 적다. 이로 인해 안개나 연기가 있는 환경에서도 상대적으로 잘 투과되어, 야간 관측이나 안개 속 물체 탐지 등에 유용하다.
에너지 레벨	적외선 광자의 에너지는 가시광선보다 낮아, 물질과 상호작용 시 화학결합을 끊지 않고 분자의 진동이나 회전 에너지 준위를 변화시킨다. 이는 비파괴적인 물질 분석을 가능케 한다.
레이저 응용	적외선 영역에서 작동하는 다양한 레이저가 개발되어 있다. 특히 $1.5\mu\text{m}$ 근처의 파장은 눈에 안전하면서도 대기 투과율이 좋아 원거리 센싱에 많이 활용된다. 이러한 적외선의 특징들은 메탄 누출 감지 장비 개발에 직접적으로 적용된다. 특히 메탄 가스는 $3.3\mu\text{m}$와 $7.6\mu\text{m}$ 부근에서 강한 흡수 밴드를 가지고 있어, 이 파장대의 적외선을 이용하면 효과적으로 메탄을 검출할 수 있다. $1654\text{nm}(1.654\mu\text{m})$ 파장은 메탄의 $2\nu_3$ 오버톤 흡수 밴드²⁾에 해당하며, 이 파장대는 대기 투과율이 좋고 상대적으로 강한 흡수를 보이면서도 눈에 안전한 장점이 있어 원거리 메탄 검출에 적합하다. 따라서 1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫폼 휴대형 레이저 메탄누출감지장비는 적외선의 분광 특성, 대기 투과 특성, 그리고 레이저 기술을 효과적으로 결합한 응용 사례라고 할 수 있다. 이 장비는 메탄 가스의 고유한 적외선 흡수 특성을 이용하여 원거리에서 비접촉식으로 메탄 누출을 감지할 수 있으며, 휴대성과 안전성을 갖춘 실용적인 솔루션을 제공한다.

2) 메탄의 $2\nu_3$ 오버톤 흡수 밴드는 분자 분광학에서 중요한 개념으로, 메탄 분자의 C-H 결합이 기본 진동 모드(ν_3)의 두 배 에너지를 흡수하여 더 높은 진동 상태로 전이하는 현상을 나타낸다. 이 오버톤 밴드는 약 6000cm^{-1} 주변의 근적외선 영역에서 관찰되며, 메탄의 분자 구조와 거동을 연구하는데 활용된다.

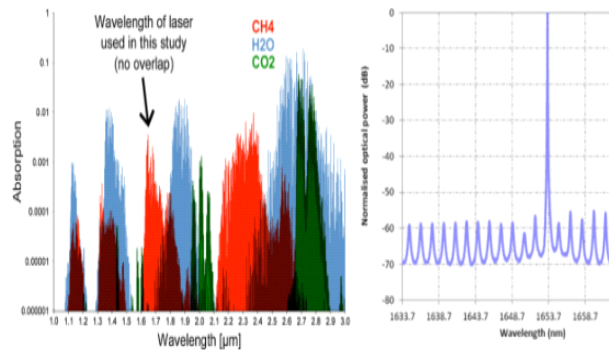
제 2 절 메탄가스의 광학적 특성

메탄(CH_4)는 지구 온난화의 주요인 중 하나로 대기중에 있는 농도를 모니터링하고 누출을 효과적으로 감지하는 것이 중요하다. 메탄의 광학적 특성을 이해하고 이를 활용하는 것은 효과적인 감지 시스템 개발에 필수적이다. 다음은 메탄가스의 주요한 광학적 특성이다.

대상 물질에 따른 흡수 파장대는 [그림 2-2]와 같고, [그림 2-3]에서 보는 바와 같이 단파장 적외선(SWIR) 중에서도 1654nm 파장은 메탄가스가 강하게 흡수되는 파장이다.(nanoplus GmbH, 2024)



[그림 2-2] 대상물질에 따른 흡수파장대



[그림 2-3] 1654nm 메탄 흡수파장

메탄가스의 흡수 영역은 분광기와 센서 같은 기기를 사용하여 감지될 수 있다. 1654nm 파장에서 메탄가스에 의해 흡수되면, 이를 감지하여 메탄의 농도를 측정할 수 있다. 이는 대기 오염 감지, 환경 모니터링, 온실가스 배출량 산정 및 추적 등에 활용될 수 있다.(백영삼, 홍정완, 2024)

메탄은 특정 적외선 파장에서 강한 흡수 특성을 보인다. 주요 흡수 밴드는 $1.65\mu\text{m}$ 근처, $3.3\mu\text{m}$ 근처, $7.6\mu\text{m}$ 근처에 위치한다. 이 중 $1.65\mu\text{m}$ 밴드는 $2\nu_3$ 오버톤 밴드로, 상대적으로 약하지만 대기 투과도가 좋아서 원거리 감지에 유용하다.(Nielsen, 1932)

메탄 가스의 굴절률은 온도와 압력, 파장에 따라 변화한다. 상온과 상압에서 가시광선 영역의 굴절률은 약 1.000444로, 공기보다 약간 높다. 이러한 차이는 광학적 간섭계를 이용한 메탄 농도 측정에 활용될 수 있다.

메탄 분자는 빛을 산란시키는 특성이 있으며, 레일리 산란과 미 산란³⁾이 주요 특징이다. 이러한 산란 특성은 대기 중 메탄의 원격 감지에 활용될 수 있다.(ElProCus, 2024)

고강도 레이저 빔과 상호작용할 때, 메탄 분자는 선형이 아닌 비선형 광학 효과를 나타낼 수 있다. 예를 들어, 코히어런트 안티-스톡스 라만 산란(CARS)은 메탄의 검출에 사용될 수 있는 비선형 효과 중 하나이다.

메탄은 특정 파장의 빛을 흡수하면 열을 발생시키고, 이로 인해서 주변 매질에 음파를 생성시킨다. 이 현상을 광음향 효과라고 하며, 광음향 분광법을 통해서 메탄의 고감도 검출이 가능하다.(FUJIFILM VisualSonics, 2024)

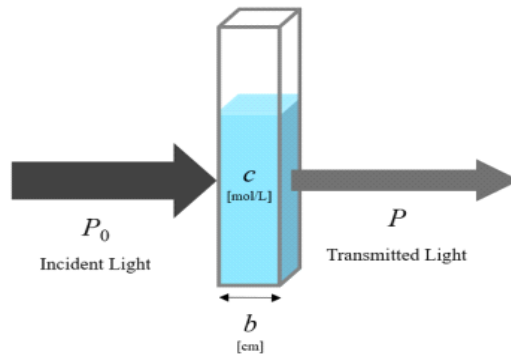
1654nm 파장을 이용한 휴대형 레이저 메탄누출검지장비는 높은 대기 투과도와 눈의 안정성, 충분한 흡수 강도, 상용 레이저 다이오드 사용 등의 이점을 가진다. 이러한 특성들로 인해 1654nm 파장은 메탄 검출에 효과적으로 활용될 수 있다.

3) 레일리 산란은 빛의 파장보다 매우 작은 입자에 의해 발생하며, 파장의 4제곱에 반비례하는 강도를 가지고 모든 방향으로 균일하게 산란되는 특징이 있다. 이는 대기 중 분자에 의해 일어나 하늘이 푸르게 보이는 원인이 된다. 반면 미 산란은 빛의 파장과 비슷하거나 더 큰 입자에 의해 발생하며, 레일리 산란보다 파장 의존성이 약하고 전방 산란이 강한 특징이 있어 구름이나 안개가 하얗게 보이는 현상을 설명한다.

제 3 절 Beer-Lambert 법칙에 근거한 메탄가스 누출검지 방법

적외선분광법(Infrared Spectrometry)의 기본 원리는 분자의 진동에 그 바탕을 두고 있다. 분자가 진동 운동을 발생시키기 위해서는 원자 종류에 따라서 고유한 진동 주파수에 해당하는 빛 에너지를 흡수한다는 점을 이용한다. 적외선분광법에는 주로 단적외선(SWIR) 영역을 사용한다. 적외선 분광법에 의한 검지 원리의 바탕은 Beer-Lambert 법칙이다.

Beer-Lambert 법칙은 빛이 물질을 통과할 때 흡수정도를 설명하는 기본 법칙으로, 분광학과 화학 분석에서 많이 사용된다. 이 법칙은 1852년 August Beer가 처음으로 제안했고, Johann Heinrich Lambert의 이전 연구를 기반으로 한다. Beer-Lambert 법칙은 [그림 2-4]와 같이 표현된다.(BYJU'S, 2024)



[그림 2-4] Beer-Lambert 법칙의 도식화

Beer-Lambert 법칙을 메탄가스 농도 측정에 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$A = \epsilon bc \quad (\text{식 2-1})$$

여기에서,

A: 메탄에 의한 흡광도

ε : 메탄의 물 흡광 계수($1.65\mu\text{m}$ 에서 약 $0.1\text{cm}^{-1}\text{atm}^{-1}$)⁴⁾

b: 광 경로 길이(cm)

c: 메탄의 농도(atm)

이 법칙은 빛의 투과율(T)과 흡광도(A) 사이의 관계를 다음과 같은 관계식으로 정의한다.

$$\text{투과율}(T) = \frac{P}{P_0} \quad \text{흡광도}(A) = -\log(T) = -\log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (\text{식 } 2-2)$$

여기에서,

T: 투과율(Transmittance)

P: 투과된 빛의 강도

P₀: 입사된 빛의 강도

이 식을 통해서 측정된 빛의 강도 비(比)(P/P₀)로부터 메탄의 농도를 계산할 수 있다.

Beer-Lambert 법칙의 주요 특성은 반비례 관계, 로그 스케일, 선형성, 그리고 가법성이다. 반비례 관계는 투과율과 흡광도 사이에 존재하는 것으로 물질의 농도가 증가하면 더 많은 빛이 흡수되어 투과율이 감소하고 흡광도가 증가하는 현상을 말한다. 이는 농도 변화에 따른 빛의 흡수와 투과 정도를 정량적으로 설명할 수 있게 해준다.

로그 스케일은 흡광도가 투과율의 로그 함수로 표현되는 특성이다. 이러한 로그 관계는 넓은 범위에서의 농도를 다룰 수 있게 해준다. 특히 고농도에서의 측정 정확도를 향상시킨다. 로그 스케일을 사용함으로써 농도의 미세한 변

4) cm^{-1} : 거리의 역수를 나타내는 것으로서 빛이 1cm 통과할 때의 흡수를 의미한다.
 atm^{-1} : 압력의 역수를 나타내는 것으로서 1기압에서의 흡수를 기준으로 한다. $0.1\text{cm}^{-1}\text{atm}^{-1}$ 의 흡수 계수는 1기압의 메탄가스에서 $1.65\mu\text{m}$ 파장의 빛이 1cm 거리를 통과할 때 약 10%의 빛이 흡수된다는 것으로 이 값은 메탄가스 검출에 매우 유용하다. 즉 높은 흡수 계수는 적은 양의 가스로도 검출이 가능하다는 것을 의미하기 때문이다.

화도 감지할 수 있어 분석의 민감도를 높인다.(Harris, 2010)

선형성은 흡광도와 농도 사이의 관계를 나타내는 것으로 흡광도는 농도와 선형 관계를 가진다. 이는 정량 분석에서 중요한 특성이며 이를 통해 표준 곡선을 이용한 미지 시료의 농도 결정이 가능해지고 정량 분석의 기초가 된다.

가법성은 여러 흡수 물질이 존재할 때에 전체 흡광도는 각 물질의 흡광도의 합과 같다는 특성이다. 이는 복잡한 혼합물의 분석에 유용하며, 여러 성분이 섞여 있는 시료에서 각 성분의 농도를 개별적으로 측정할 수 있게 해준다. 이와 같이 Beer-Lambert 법칙을 특징으로하여 적외선분광법 방식으로 메탄 누출 검지방식에 대하여 요약하면 다음과 같다.(Pavia,D.L, 2010)

빛과 물질 사이의 상호작용은 흡수에 의해서 일어나며 물질의 농도가 적절한 범위 내에서 선형관계를 가진다. 빛이 물질을 투과할 때 흡수도는 경로 길이와 물질의 농도에 비례한다. 즉, 입사광의 강도와 투과광의 강도 비율대수는 매질의 두께가 일정할 때는 빛은 통과하는 매질의 농도에 비례하고(Beer 법칙), 물질의 농도가 일정할 때 매질의 두께에 비례한다(Lambert 법칙)는 것이다. 이를 이용하여 빛이 물질에 흡수되는 정도(흡수도)를 측정하여서 물질의 농도를 구할 수 있다.(BYJU'S, 2024)

제 4 절 선행연구

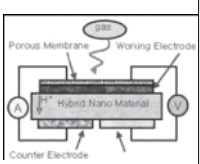
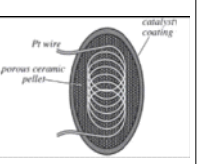
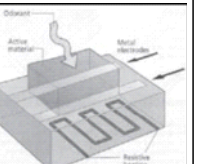
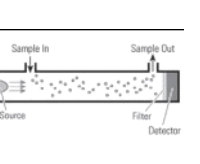
1) 기존의 메탄가스누출검사방법

가) 일반적인 근거리 검지 기술

전기화학식 가스검지기는 가스와 전극 간 화학반응으로 발생하는 전류를 측정하는 방식이다. 높은 선택성과 정확도를 가지며 저전력 소모가 특징이다. 접촉연소식 가스검지기는 가연성 가스가 촉매 표면에서 연소할 때 발생하는 열을 감지하는 방식이다. 가연성 가스 검출에 적합하며 빠른 응답 속도를 가진다. 반도체식 가스검지기는 가스 흡착에 따른 반도체 소자의 전기저항 변화를 측정하는 방식이다. 다양한 가스 검출이 가능하고 소형화가 용이하나 선택성이 낮은 편이다. 광학식 가스검지기는 가스의 고유 광흡수 특성을 이용해 농도를 측정하는 방식이다. 높은 선택성과 정확도를 가진다.

각각의 센서 방식은 위에서 설명한 것과 같은 장단점을 갖고 있으나, 모두 1m 이내의 근거리 혹은 접촉식 장비이다. 이를 표로 나타내면 [표 2-3]과 같다.(한국과학기술정보연구원, 2022 재구성)

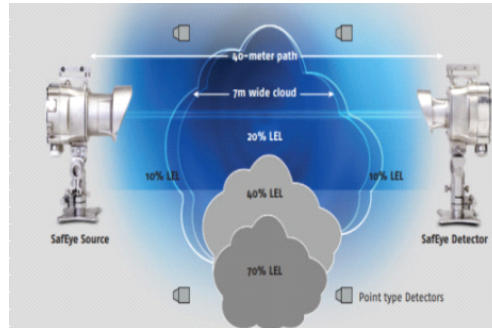
[표 2-3] 근거리 측정 센서방식

구분	전기화학식	접촉연소식	반도체식	적외선식
모식도				
동작 원리	가스와의 반응에 의한 전극 간의 기전력 변화	가연성 가스와의 발열 반응에 열선의 저항변화	가스와의 반응에 따른 금속 산화물의 저항 변화	가스에 의한 적외선 흡수도 변화
활용 제품	산소가스센서 유독가스센서	가연성가스 경보기	반도체식 가스센서	이산화탄소 측정기

나) 원거리 감지 기술

(1) OPEN PATH FTIR 기술

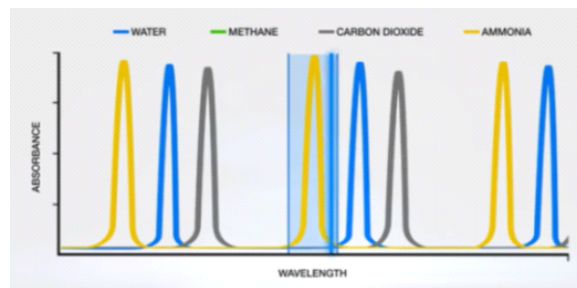
오픈패스 가스 검지기(Open Path Gas Detector)는 [그림 2-5]와 같이 레이저 발신부와 수신부로 구성된 고정식 가스 감지 장비이다.



[그림 2-5] Open Path Gas Detector 측정원리

출처: Spectrex, 2024

이 기술은 [그림 2-6]과 같이 레이저 빔을 사용하여 가스를 감지하는 것으로 발신부에서 발사된 레이저 빔이 수신부에 도달하는 과정에서 가스 구름을 통과하게 되면, 특정 파장의 빛이 흡수되며, 이를 통해 가스의 존재와 농도를 측정할 수 있다.(Spectrex, 2024)



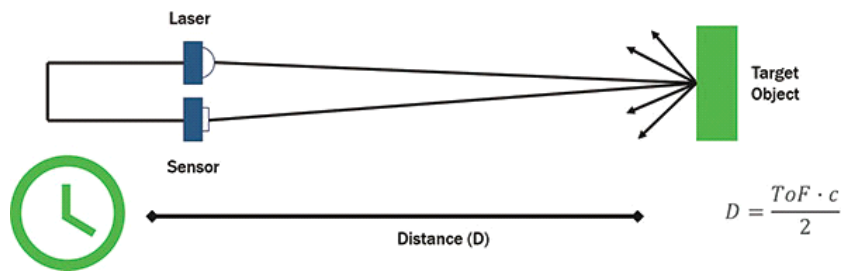
[그림 2-6] 파장흡수스펙트럼

출처: Spectrex, 2024

오픈패스 가스 검지기는 석유화학 플랜트, 가스 저장 시설, 파이프라인 등 다양한 산업 현장에서 활용되며, 넓은 영역의 가스 누출을 효과적으로 감지한다.(Spectrex, 2024)

(2) LIDAR 방식

원거리 가스누출 검지를 위한 LIDAR 기술은 [그림 2-7]과 같이 레이저 빔을 이용하여 대기 중 가스의 존재와 농도를 측정하는 첨단 센싱 방식이다.



[그림 2-7] LIDAR 방식 측정원리

출처: Sundnas, 2024

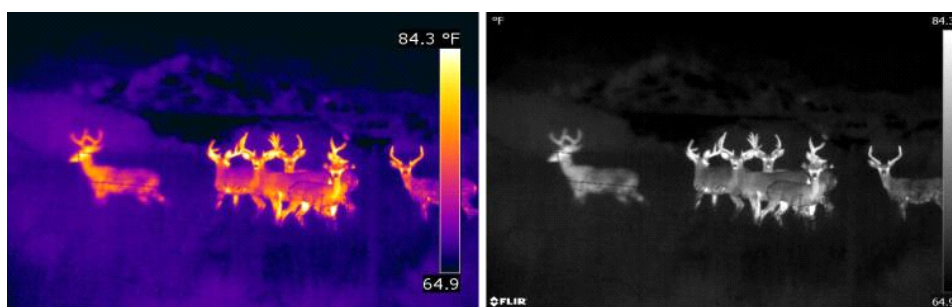
이 기술은 DIAL(Differential Absorption LIDAR) 원리를 기반으로 하며, 다음과 같이 작동한다. DIAL 시스템은 두 개의 서로 다른 파장을 가진 레이저 펄스를 대기 중으로 발사한다. 하나는 목표 가스가 강하게 흡수하는 파장(온파장)이고, 다른 하나는 흡수가 거의 없는 파장(오프파장)이다. 이 두 파장의 레이저 빔이 대기를 통과하면서 목표 가스에 의해 흡수되거나 산란된 후 수신기로 돌아온다. 수신된 두 파장의 신호 강도 차이를 분석하여 가스의 존재 여부와 농도를 계산한다. DIAL LIDAR 시스템의 주요 구성요소는 다음과 같다.(Sundnas, 2024)

- (가) 레이저 송신부: 두 가지 파장의 레이저 펄스를 생성하고 발사한다.
- (나) 수신 광학계: 반사된 레이저신호를 수집한다.
- (다) 광 검출기: 수집된 광 신호를 전기 신호로 변환한다.
- (라) 신호처리 및 분석 시스템: 수신신호를 처리하고 가스 농도를 계산한다.

이 기술의 장점은 원거리에서 비접촉식으로 가스를 검지할 수 있다는 점이다. 넓은 영역의 가스 분포를 빠르게 스캔할 수 있고, 특정 가스에 대한 선택성이 높아 여러 가지 가스를 동시에 측정할 수 있다. 그러나 악천후 조건에서는 성능이 저하될 수 있으며, 고가의 장비와 복잡한 신호처리 기술이 필요하다. 또한, 측정하고자 하는 가스의 흡수 스펙트럼에 맞는 정확한 파장의 레이저 소스가 필요한 점 등의 단점이 있다.(Sundnas, 2024)

(3) 열화상 기술

적외선 열화상 기술은 원격에서 가스 누출을 탐지할 수 있는 효과적인 방법이다. 이 기술은 열화상 카메라를 활용하여 가스 누출을 시각화하고 감지한다. 열화상 탐지의 기본 원리는 모든 물체가 절대온도 이상에서 적외선을 방출한다는 사실에 근거한다. 가스가 누출되면 주변 환경과의 온도 차이가 발생하며, 열화상 카메라는 이러한 온도 차이를 포착하여 [그림 2-8]과 같이 가스 누출을 시각화한다.(FLIR, 2024)



[그림 2-8] 열화상 측정장비 디스플레이 화면

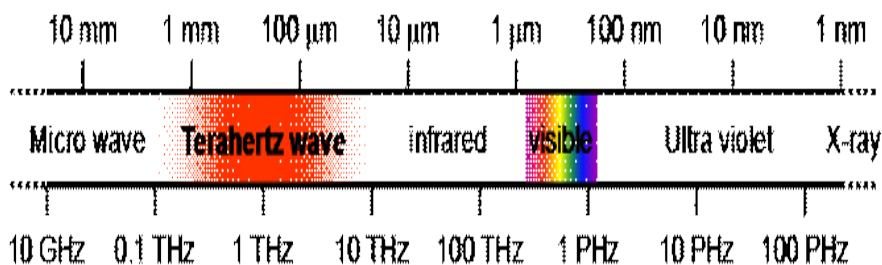
출처: FLIR, 2024

열화상 카메라는 적외선 집광 장치, 적외선 센서, 신호 변환 장치, 그리고 화면 표시 장치로 구성된다. 적외선 집광 장치는 적외선을 모으고, 적외선 센서는 이를 전기 신호로 변환한다. 신호 변환 장치는 이 전기 신호를 영상으로 변환하며, 최종적으로 화면 표시 장치를 통해 열화상 이미지가 나타난다. 이 기술의 주요 이점으로는 원거리 탐지 능력, 실시간 관찰 가능성, 비접촉식 측

정, 그리고 광범위한 영역 검사 능력을 들 수 있다. 열화상 탐지 기술은 다양한 산업 분야에서 활용된다. 석유화학 산업에서는 관로, 저장 용기, 밸브 등의 누출 검사에 사용되며, 발전소에서는 가스 터빈, 보일러 등의 누출 점검에 활용된다. 환경 감시 분야에서는 매립지나 산업 단지 등에서의 가스 배출 관찰에 이용되고, 건물 안전 분야에서는 가스 배관의 누출 점검에 사용된다. 그러나 열화상 탐지 기술에도 일부 제약이 존재한다. 강우, 안개, 강풍 등의 기상 조건은 탐지 성능을 저하시킬 수 있으며, 가스와 주변 환경의 온도 차이가 미미할 경우 탐지가 어려울 수 있다. 또한 모든 가스가 적외선을 흡수하는 것은 아니므로, 탐지 가능한 가스 종류가 한정적이라는 점도 고려해야 한다.(Jadin,M,S, 2014)

(4) 테라헤르츠 등 미래 기술

테라헤르츠 기술은 원거리에서 가스 누출을 검지할 수 있는 유망한 미래 기술이다. 이 기술은 [그림 2-9]와 같이 전자기 스펙트럼에서 마이크로파와 적외선 사이에 위치한 테라헤르츠파(0.1~10THz)를 이용한다.(Hu,B,B, 1995)



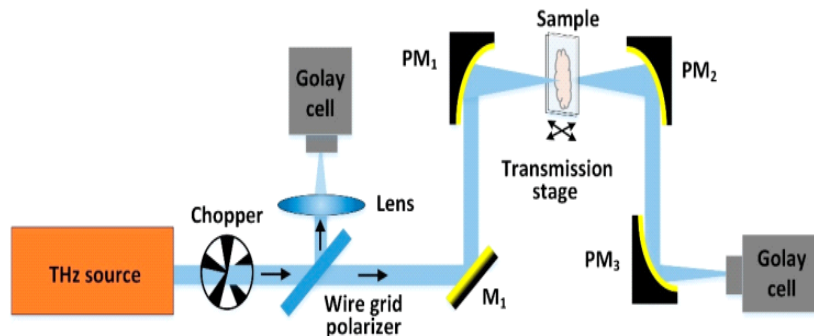
[그림 2-9] 테라헤르츠 측정영역

출처: Hu,B,B, 1995

테라헤르츠 가스 검지 기술의 원리는 가스 분자의 고유한 회전 및 진동 에너지 준위와 테라헤르츠파의 상호작용에 기반한다. 각 가스 분자는 특정 테라헤르츠 주파수에서 고유한 흡수 스펙트럼을 가지고 있어, 이를 통해 가스의 종류와 농도를 정확하게 식별할 수 있다. 이 기술의 주요 장점은 높은 감도와

선택성이다. 테라헤르츠파는 많은 가스 분자의 회전 및 진동 모드와 일치하여 ppb(parts per billion) 수준의 극미량 가스도 검출할 수 있다. 또한, 각 가스의 고유한 흡수 스펙트럼을 통해 여러 가스를 동시에 식별할 수 있어 선택성이 뛰어나다.(곽민환 외, 2006)

테라헤르츠 가스 검지 시스템은 [그림 2-10]과 같이 크게 테라헤르츠파 발생기, 가스 샘플과 상호작용하는 부분, 그리고 검출기로 구성된다. 테라헤르츠파 발생 방식으로는 광학적 방법, 전자 소자 기반 방법, 양자 캐스케이드 레이저 등이 사용된다. 검출 방식으로는 쇼트키 다이오드, 볼로미터, 광전도 안테나 등이 활용된다.(BCC Research, 2014)



[그림 2-10] 테라헤르츠 측정원리
출처: BCC Research, 2014

테라헤르츠 기술은 원거리 가스 검지에 특히 유용하다. 테라헤르츠파는 대기 중 전파 손실이 적어 수백 미터 이상의 거리에서도 가스 검지가 가능하다. 이는 위험 지역이나 접근이 어려운 곳의 가스 누출 감지에 매우 적합하다.

응용 분야로는 산업 안전, 환경 모니터링, 국가 안보 등이 있다. 석유화학 플랜트나 가스 저장 시설에서의 가스 누출 감지, 대기 오염 물질 모니터링, 폭발물 및 화학 무기 탐지 등에 활용될 수 있다. 또한 의료 분야에서는 호흡 가스 분석을 통한 질병 진단에도 응용이 가능하다. 그러나 테라헤르츠 기술에는 몇 가지 과제도 존재한다. 현재 테라헤르츠 소자의 출력이 낮고 효율이 떨어져 시스템의 소형화와 저전력화가 필요하다. 또한 대기 중 수분에 의한 흡수로 인해 장거리 전파에 제약이 있어 이를 극복하기 위한 연구가 진행 중이다

다. 결론적으로, 테라헤르츠 기술은 원거리 가스 누출 감지를 위한 혁신적인 미래 유망 기술이다. 높은 감도와 선택성, 원거리 검출 능력을 바탕으로 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대된다. 향후 소자 기술의 발전과 시스템 최적화를 통해 더욱 실용적이고 효과적인 가스 검지 솔루션으로 자리잡을 것으로 전망된다.(BCC Research, 2014)

2) TDLAS⁵⁾ 기술을 이용한 메탄누출검지방법

가) 최초의 기술 적용 사례

NASA의 제트추진연구소(JPL)에서 화성 탐사선에 탑재할 목적으로 개발한 튜너블 레이저 분광계(Tunable Laser Spectrometer, TLS) 기술이 메탄 누출 감지에 활용되었다. 이 기술은 원래 화성 대기 중 미량의 메탄을 검출하여 생명체 존재 가능성을 탐색하기 위해 개발되었다. NASA는 이 기술을 지구에서의 메탄 누출 감지에 활용하기 위해 기술을 이전했으며, 이를 바탕으로 개발된 휴대형 메탄 누출 감지기는 천연가스 시설, 매립지 등에서 메탄 누출을 효과적으로 탐지할 수 있게 되었다.(KQED Science, 2013)

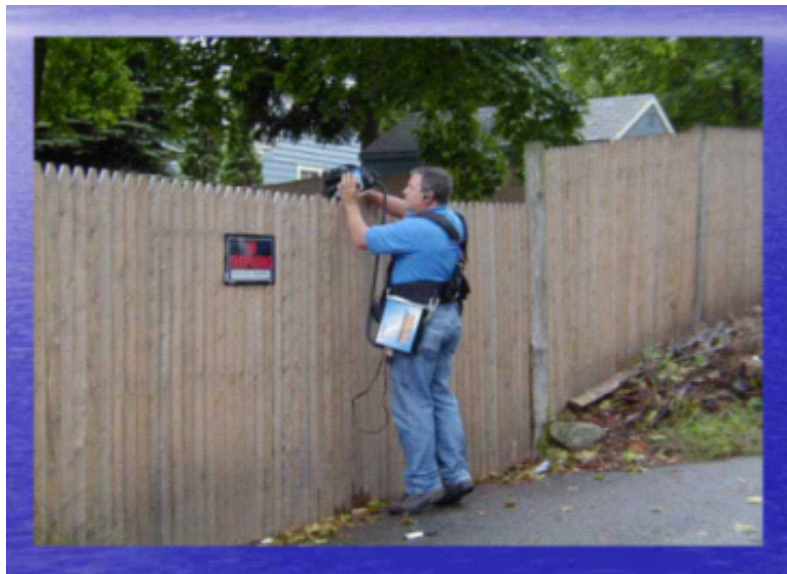


[그림 2-11] NASA 화성 생물체 탐사기술에 적용
출처: KQED Science, 2013

- 5) TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)는 특정 가스의 농도를 측정하는데 사용되는 고감도 비접촉식 분석 기술이다. 이 기술은 가변 다이오드 레이저를 사용하여 특정 파장에서 빛을 방출하고, 해당 파장에서 가스 분자가 빛을 흡수하는 정도를 측정한다. 이를 통해 가스의 농도를 정밀하게 파악할 수 있다.

나) 초기 개발 제품

휴대형 레이저메탄검지기가 초기제품으로 [그림 2-12] 미국 HEATH CONSULTANT사와 [그림 2-13] 일본 TOKYO GAS ENGINEERING에서 출시되었을 때는 여러 단점이 있었다. 크기 면에서 이 초기 모델들은 상당히 부피가 커서 휴대성이 떨어졌다. 무게 또한 무거워서 장시간 사용 시 작업자의 피로도가 높았다. 성능 측면에서는 측정 거리가 제한적이었고, 배터리 수명이 짧아 지속적인 현장 작업에 어려움이 있었다. 이러한 단점들로 인해 초기 모델들은 실제 현장에서의 활용도가 낮았고, 사용자 편의성 측면에서 개선이 필요했다.



[그림 2-12] 초기 미국산 제품 및 특징

출처: Frish, M. B, 2005



[그림 2-13] 초기 일본산 제품 및 특징

출처: Iseki, T. 2004

3) 휴대형 레이저 메탄검지 장비개발을 위한 세부기술

가) 레이저 다이오드(Laser Diode) 개발

(1) 레이저의 정의

레이저는 [그림 2-14]와 같이 광대역파, 고에너지, 색순수성, 고지향성, 코히어런스 등의 특성을 가진 특수한 형태의 빛이다. 레이저는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 약자로, 유도방출에 의한 빛의 증폭을 의미한다.

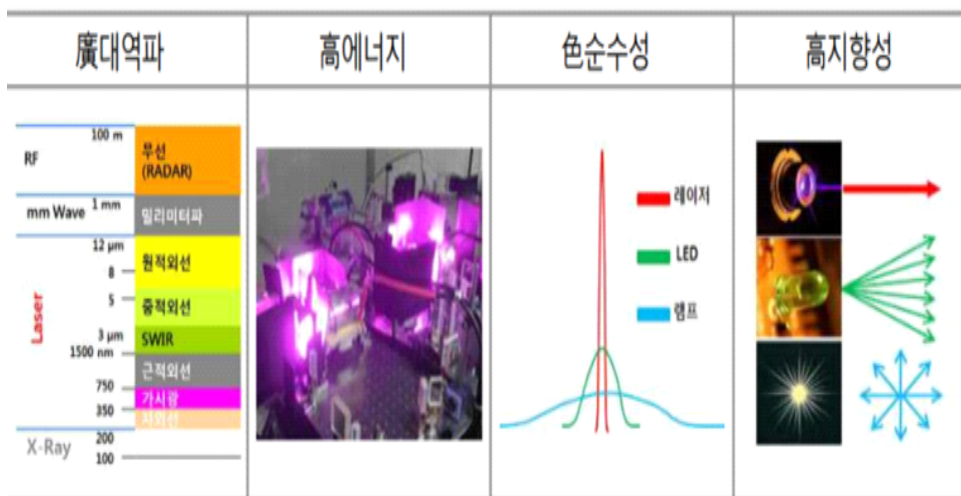
레이저는 일반 광원과 달리 매우 좁은 파장 대역의 빛을 방출하는 광대역파 특성을 가지고 있다. 또한 매우 높은 에너지 밀도를 갖는 고에너지 광원으로, 좁은 영역에 집중된 강한 빛을 만들어낼 수 있다. 레이저 빛은 거의 단일 파장으로 이루어진 순수한 색을 나타내는 색순수성을 지니고 있어 특정 파장의 빛만을 선택적으로 사용할 수 있다.

레이저 빔은 매우 작은 각도로 퍼져나가는 고지향성을 가지고 있어 먼 거리까지 도달할 수 있으며, 좁은 영역에 에너지를 집중시킬 수 있다. 또한 레이저 빛은 위상이 일치하는 코히어런스⁶⁾ 특성을 갖고 있어 간섭 현상을 일으

킬 수 있다.

이러한 레이저의 고유한 특성들로 인해 레이저는 정밀 가공, 의료, 계측, 통신 등 다양한 산업 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 특히 고출력 레이저는 금속 절단, 용접 등의 산업 가공 분야에서 중요한 역할을 하고 있으며, 저출력 레이저는 광통신, 광저장장치, 레이저 프린터 등에 사용되고 있다. 의료 분야에서도 레이저의 정밀성과 고에너지 특성을 이용한 수술 및 치료에 널리 사용되고 있다.

레이저 기술은 지속적으로 발전하고 있으며, 새로운 레이저 소재와 구조의 개발, 출력 및 효율 향상, 소형화 등을 통해 그 응용 범위가 계속 확대되고 있다. 이에 따라 레이저 산업은 미래 성장 동력으로서 큰 주목을 받고 있으며, 첨단 산업 발전의 핵심 기술로 자리잡고 있다.(중소기업기술로드맵 2018-2020, 2017)



[그림 2-14] 레이저의 특성

- 6) 레이저의 코히어런스 특성은 레이저 빔의 위상이 시간적, 공간적으로 일치하는 성질로서 코히어런트한 레이저 빔들이 만나면 보강 간섭과 상쇄 간섭을 일으켜 간섭 무늬를 만들 수 있다. 선행연구과정에서 레이저 메탄 검지기가 메탄 가스뿐만 아니라 형광등에도 반응하였다. 이는 메탄 검지에 사용되는 레이저의 파장과 형광등에서 방출되는 빛의 일부 파장이 중첩된 것으로 파악되어 형광등 빛을 차단하는 광학 필터를 사용하여 문제를 해결하였다.

(2) LD와 LED의 구조적 차이

LD(레이저 다이오드)와 LED(발광 다이오드)는 [표 2-4]와 같이 모두 전기 에너지를 빛 에너지로 변환하는 소자이지만, 그 구조와 작동 원리에 있어 중요한 차이가 있다. LED는 p형 반도체와 n형 반도체를 접합한 구조로 되어 있다. 전류가 흐르면 전자와 정공이 재결합하면서 빛을 방출한다. LED에서 발생하는 빛은 자연 방출에 의한 것으로, 비간섭성이며 넓은 스펙트럼을 가진다.

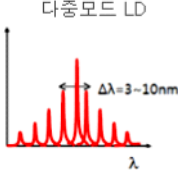
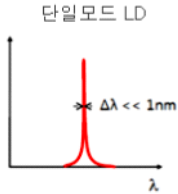
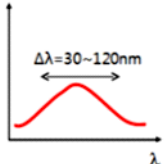
LD는 LED보다 복잡한 구조를 가지고 있다. 기본적인 p-n 접합 구조에 더해, 활성층⁷⁾과 클래딩층⁸⁾이 추가되어 있다. 또한, 공진기 역할을 하는 반사경이 양쪽에 위치해 있어 빛의 증폭과 단색화가 이루어진다. LD에서는 유도 방출에 의해 빛이 발생하며, 이로 인해 간섭성⁹⁾이 높고 좁은 스펙트럼의 빛이 생성된다.(한송희, 2014)

7) 활성층은 LD에서 전자와 정공의 재결합이 주로 일어나는 영역으로, 빛이 발생하고 증폭되는 핵심 부분이다.

8) 클래딩층은 활성층을 둘러싸고 있는 층으로, 활성층보다 밴드갭이 크고 굴절률이 낮아 빛을 활성층 내에 가두는 역할을 하는 부분이다.

9) 간섭성은 LD에서 발생하는 빛의 파장과 위상이 일정하여 빛의 결맞음 정도가 높은 특성이다.

[표 2-4] LD와 LED의 특성과 차이점

	LD	LED
발광방식	유도방출(Stimulated Emission)	자연방출(Spontaneous Emission)
특성	간섭성(coherent)	비간섭성(incoherent)
	광 공진기 구조를 갖춘	광 공진기 구조가 없음
	발광되는 형태가 좁음	발광되는 형태가 상대적으로 넓음
장점	고속으로 변조가 가능함	제조가 쉬움
	스펙트럼 폭이 좁음	제조비용이 낮음
	광섬유와 결합이 용이	온도의 영향에 둔감
	결합효율이 높다	유효수명이 길다
전형적인 출력 스펙트럼 모양과 폭	다중모드 LD  단일모드 LD  스펙트럼 폭이 좁고 높은 광 출력을 보임.	 스펙트럼이 넓고 낮은 광 출력을 보임.
출력표시	W 또는 Joule	Im 또는 cd

출처: 정보통신기술용어해설. (2021) 재구성

(3) LD(레이저 다이오드)의 패키징(Packaging) 타입

광학식 레이저 다이오드는 의학, 광학, 산업 등 다양한 분야에서 활용되는 중요한 광원 소자이다. 주요 패키징 방식으로는 버터플라이 방식, 캔 타입 방식, 미니플랫 방식 등이 있으며, 각 방식별로 장단점과 적용 분야가 다르다.

(가) 패키징 방식에 따른 분류

버터플라이 방식은 고출력, 고신뢰성이 요구되는 응용 분야에 주로 사용된다. 이 방식은 레이저 칩과 광학 부품들을 금속 패키지 내부에 정밀하게 정렬하여 배치하고, 열전소자(TEC)를 내장하여 온도 제어가 가능하다는 장점이 있다. 특히 광통신용 레이저 다이오드에 많이 적용되며, 장거리 광 전송에 적합하다. 다만 패키지 크기가 크고 제작 비용이 높다는 단점이 있다.

캔 타입 방식은 원통형 금속 패키지를 사용하는 방식으로, 구조가 단순하고 제작이 용이하여 저가형 제품에 많이 적용된다. 광출력은 버터플라이 방식에 비해 낮지만 소형화가 가능하고 생산성이 높다는 장점이 있다. 주로 광 저장장치, 레이저 프린터, 바코드 스캐너 등에 사용된다. 그러나 열 방출 효율이 낮고 고출력 구현에 한계가 있다는 단점이 있다.

미니플랫 방식은 평면형 패키지를 사용하는 방식으로, 소형화와 저가격화에 유리하다. 특히 최근 모바일 기기용 레이저 다이오드에 많이 적용되고 있다. 패키지 크기가 작아 공간 제약이 있는 응용 분야에 적합하지만, 열 방출 효율이 낮고 광학 정렬이 어려운 단점이 있다.(정보통신기술용어해설, 2024)

(나) 사용 분야에 따른 분류

레이저 다이오드의 의료 분야 응용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 피부 치료, 안과 수술, 치과 치료 등에 레이저 다이오드가 광원으로 사용되고 있으며, 특히 저출력 레이저 치료(LLLT)에 대한 연구가 주목받고 있다. LLLT는 세포 활성화, 혈액순환 개선, 염증 감소 등의 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 최근에는 광역학 치료(PDT)에 사용되는 레이저 다이오드 개발도 활발히 이루어지고 있다.

산업 분야에서는 레이저 다이오드를 이용한 가공, 용접, 절단 등의 응용이 확대되고 있다. 특히 고출력 다이오드 레이저(HPDL)의 개발로 기존 CO₂ 레이저나 YAG 레이저를 대체하는 추세이다. HPDL은 에너지 효율이 높고 유지보수가 용이하다는 장점이 있다. 또한 3D 프린팅, 레이저 마킹 등 새로운 응용 분야도 확대되고 있다.

광통신 분야에서는 고속, 장거리 전송을 위한 레이저 다이오드 개발이 지

속되고 있다. 특히 파장분할다중화(WDM) 시스템용 레이저 다이오드 어레이 개발이 주목받고 있다. 이를 위해 DFB(Distributed Feedback)¹⁰⁾ 레이저 방식, VCSEL(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)¹¹⁾ 방식 등 다양한 구조의 레이저 다이오드가 연구되고 있다.(차세대 레이저산업의 기술동향과 광(光) 관련 부품 시장 분석, 2024)

(다) 연구 분야에 따른 분류

레이저 다이오드의 성능 향상을 위한 소재와 구조 연구도 활발하다. 특히 GaN 계열의 청색, 녹색 레이저 다이오드 개발이 주목받고 있으며, 이를 통해 디스플레이, 조명 등의 분야에서 새로운 응용이 기대되고 있다. 또한 양자점, 양자우물 등 나노 구조를 이용한 고효율 레이저 다이오드 개발 연구도 진행 중이다.

레이저 다이오드의 신뢰성 향상을 위한 연구도 중요한 주제이다. 특히 고출력 동작 시 발생하는 열 문제 해결을 위해 다양한 방열 구조와 패키징 기술이 연구되고 있다. 또한 장기 안정성 확보를 위한 노화 메커니즘 분석과 수명 예측 모델 개발 등의 연구도 진행되고 있다.

레이저 다이오드 구동 회로 및 제어 기술 개발도 중요한 연구 분야이다. 고속 변조, 정밀 파장 제어, 노이즈 저감 등을 위한 회로 설계 기술이 연구되고 있으며, 특히 MOPA(Master Oscillator Power Amplifier) 구조를 이용한 고출력, 협대역 레이저 다이오드 시스템 개발이 주목받고 있다.

이와 같이 광학식 레이저 다이오드는 다양한 패키징 방식과 응용 분야에 따라 지속적으로 발전하고 있으며, 소재, 구조, 패키징, 구동 기술 등 다양한 측면에서 연구 개발이 이루어지고 있다. 향후 더욱 고성능, 고신뢰성의 레이저 다이오드 개발을 통해 의료, 산업, 통신 등 다양한 분야에서의 혁신적인 응용이 기대된다.(성혁기, 2011)

10) DFB 레이저는 활성층 내부에 주기적인 격자 구조를 가지고 있어 특정 파장의 빛만을 선택적으로 증폭하는 레이저 다이오드이다.

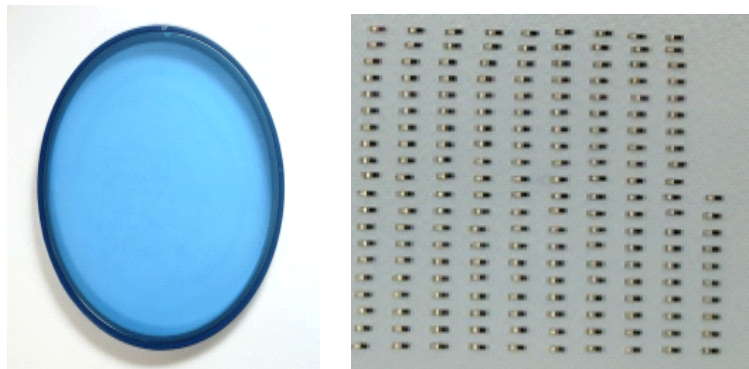
11) VCSEL은 수직 방향으로 빛을 방출하는 구조를 가진 레이저 다이오드로, 작은 크기와 낮은 소비전력, 그리고 2차원 배열이 용이한 특징을 가진다.

(라) 레이저 다이오드 선행연구 사례

국가R&D연구보고서[글로벌 수준의 휴대형 원거리 천연가스 누출검지장비 개발]에서 Butterfly type Laser Diode를 제시하고 있으며, 그 제작과정은 다음과 같다.

① 광 웨이퍼 설계 및 제작

광 웨이퍼 설계 및 제작은 1653 ± 3 nm 파장 대역에서 이루어졌다. 이 과정은 MOCVD(금속 유기 화학 기상 증착) 기술을 사용하여 수행되었다. MOCVD 공정은 복잡한 반도체 다층 구조를 만들기 위해 결정성장으로 성장시키는 데 사용되는 화학 기상 증착 방법이다. 웨이퍼 제작 과정에서는 InGaAsP/InGaAsP MQW 활성층 구조가 사용되었으며, 이는 광학 모드의 유효면적을 증가시킬 수 있는 구조이다. [그림 2-15]와 같이 제작된 웨이퍼는 개별 다이로 절단되는 다이싱/쏘잉 공정을 거쳤다. 이 과정에서 일부 장치의 손실이나 손상이 발생할 수 있으며, 이는 기회 비용과 재료 손실을 초래한다

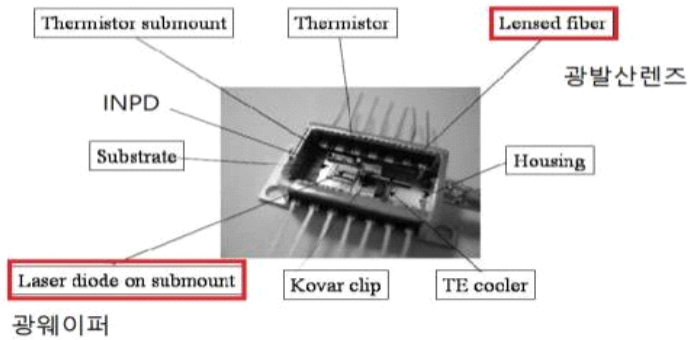


[그림 2-15] 제조된 레이저 다이오드 칩

② INPD 설계 및 제작

INPD¹²⁾ 설계 및 제작은 M-PD(Monitoring Photodiode)로 사용되었다 [그림 2-16]과 같이 이 과정은 레이저 다이오드의 출력을 모니터링하고 제어하는 데 중요한 역할을 한다.

12) INPD: Indium Phosphide Photodiode(인듐 인화물 광다이오드)의 약자

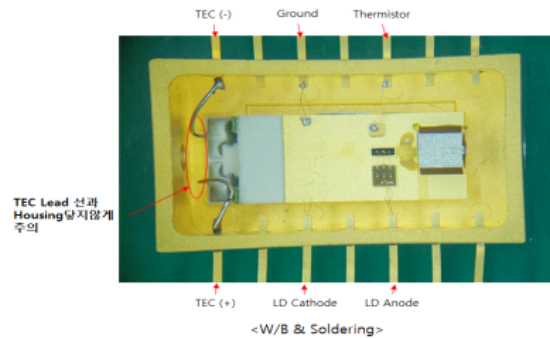


[그림 2-16] INPD 설계 제작 (M-PD제작 단계)

③ TEC Control 소자 설계 및 시험제작

TEC(Thermoelectric Cooler) Control 소자의 설계와 시험제작은 레이저 다이오드의 온도를 정밀하게 제어하기 위해 수행되었다. [그림 2-17]과 같이 TEC와 MOB(Mounting Optical Bench)의 다이 본딩 과정에서는 정확한 정렬이 중요하며, 특정 온도와 시간 조건에서 경화 과정을 거쳤다. TEC 어셈블리는 하우징과 결합되었으며, 이후 와이어 본딩과 TEC 리드 솔더링 작업이 진행되었다. 이 과정에서 서브마운트, 접지, 서미스터 등의 연결이 이루어졌다.

2nd Wire Bonding & TEC Lead Soldering

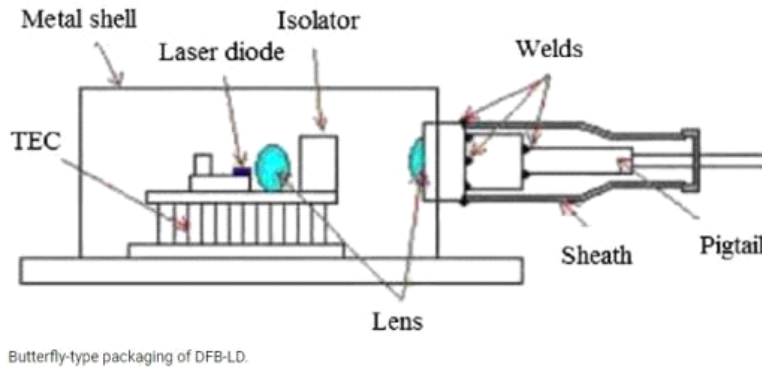


- TEC Lead 선 Soldering 후 Sub-mount, Ground, Thermistor to Pin Wire Bonding 진행(3회)
- Thermistor 와 Thermistor측 Ground은 Pin이 짧아 Wire Bonding 안되는 관계로 Epoxy Bonding 진행(3회)

[그림 2-17] TEC Control 소자 버터플라이 내부에 장착

④ 광 발산렌즈 설계 및 제작

광 발산렌즈의 설계와 제작은 [그림 2-18]과 같이 버터플라이 패키지의 측면 구조를 고려하여 이루어졌다. 렌즈의 정렬과 본딩 작업이 수행되었으며, 이후 아이솔레이터 본딩 과정이 진행되었다.



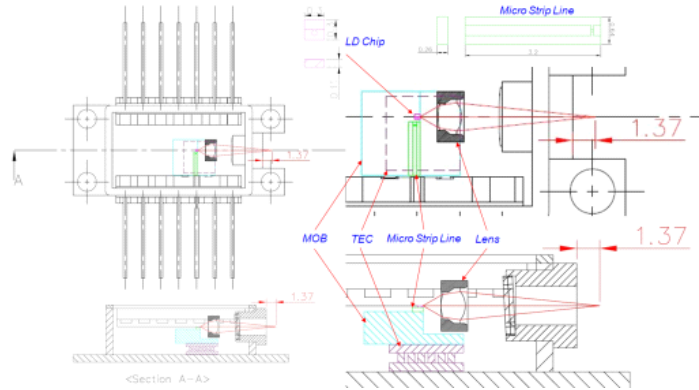
[그림 2-18] 광 발산렌즈 설계제작

⑤ 최적 내부설계

버터플라이 레이저 다이오드의 최적 내부 설계는 [그림 2-19]와 같이 여러 단계를 거쳐 완성되었다. LENS-coupling 방법을 이용하여 DFB-LD 센서 모듈을 최적화하였으며, MOCVD 성장을 통해 LENS-joint를 형성하였다. 초기에는 아날로그 LD 구조로 최적화를 진행하였으며, 이후 BWG(Buried Waveguide) 영역은 deep ridge 형태로 설계되었다. 활성층의 폭을 $2\mu\text{m}$ 이하로 형성하여 발진 임계전류를 감소시키고 횡 방향 단일모드 조건을 확보하였다.

최종적으로 제작된 DFB-LD 센서 모듈은 약 10mW의 광 출력을 보였으며, 발진 임계전류는 15.2mA, SE(Slope Efficiency)는 0.3W/A 정도의 특성을 나타냈다. 레이저 용접 후 측정된 최종 광 출력은 5.1mW였다.

이러한 과정을 통해 제작된 Butterfly type Laser Diode는 메탄가스 센서 용으로 적합한 1654nm 파장에서 작동하며, 고출력과 안정성을 갖춘 성능을 보여주었다.



[그림 2-19] 최종 완성된 패키지 하우징 설계도

나) 광학렌즈 기술

레이저 다이오드는 다양한 산업 분야에서 광범위하게 활용되고 있는 핵심 광원 소자이다. 이러한 레이저 다이오드를 효과적으로 활용하기 위해서는 고품질의 광학계 구성이 필수적이며, 그중에서도 광학렌즈 기술이 매우 중요한 역할을 한다.

광학렌즈 기술은 레이저 빔의 집속, 확대, 평행화 등 다양한 광학적 기능을 수행하는데 필수적이다. 레이저 다이오드에서 방출되는 빔은 일반적으로 발산각이 크고 비대칭적인 특성을 가지고 있어, 이를 원하는 형태로 성형하고 제어하기 위해서는 정교한 광학렌즈 설계 및 제작 기술이 요구된다.

광학렌즈 기술의 주요 연구 분야로는 비구면 렌즈 설계 및 제작, 회절 광학 소자 개발, 나노 구조를 이용한 메타렌즈 등이 있다. 비구면 렌즈는 구면 수차를 줄이고 광학계의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 회절 광학 소자는 렌즈의 두께를 줄이면서도 원하는 광학적 기능을 구현할 수 있어 소형화에 유리하다. 메타렌즈는 나노 구조를 이용하여 빛의 위상을 제어함으로써 초박형 렌즈를 구현할 수 있는 기술이다.

(1) 렌즈의 특징과 차이점

볼록렌즈는 구형의 투명한 구슬 형태의 렌즈로, 간단한 구조로 높은 집광 효율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 볼록렌즈는 주로 광섬유 커플링, 레이저 다이오드의 빔 성형, 이미징 시스템 등에 활용된다. 볼록렌즈의 주요 연구 분

야로는 고정밀 제작 기술, 표면 코팅 기술, 복합 렌즈 시스템 개발 등이 있다.

최근 연구에 따르면, 볼록렌즈의 표면에 나노 구조를 형성하여 반사방지 효과를 높이고 광학 성능을 개선하는 기술이 개발되고 있다. 또한, 여러 개의 볼록렌즈를 조합하여 복잡한 광학 기능을 구현하는 연구도 진행되고 있다. 예를 들어, 두 개의 볼록렌즈를 정밀하게 정렬하여 고성능 광섬유 커플러를 제작하는 기술이 보고되었다.

프레즈넬 렌즈는 일반 렌즈의 곡면을 여러 개의 동심원 형태로 분할하여 평면에 가깝게 만든 렌즈이다. 이 렌즈는 두께가 얇고 가벼우면서도 큰 구경과 짧은 초점 거리를 구현할 수 있어 다양한 응용 분야에서 활용되고 있다. 프레즈넬 렌즈는 주로 조명 시스템, 태양광 집광, 프로젝션 디스플레이 등에 사용된다.

프레즈넬 렌즈 기술의 주요 연구 분야로는 고정밀 미세 가공 기술, 회절 효율 향상 기술, 광대역 특성 구현 기술 등이 있다. 최근 연구에서는 나노 임프린트 리소그래피 기술을 이용하여 고정밀 프레즈넬 렌즈를 대량 생산하는 방법이 개발되었다. 이 기술을 통해 파장 이하의 미세 구조를 가진 프레즈넬 렌즈를 제작할 수 있어, 회절 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

또한, 프레즈넬 렌즈의 단점인 색수차를 줄이기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, 서로 다른 재료의 프레즈넬 렌즈를 조합하여 색수차를 보정하는 아크로매틱 프레즈넬 렌즈 기술이 개발되었다. 이 기술은 특히 태양광 집광 시스템에서 효율을 높이는데 기여할 것으로 기대된다.

레이저 다이오드 응용 분야에서 프레즈넬 렌즈는 주로 빔 성형과 집광에 활용된다. 예를 들어, 고출력 레이저 다이오드의 빔을 균일하게 분포시키거나 특정 패턴으로 성형하는데 프레즈넬 렌즈가 사용된다. 최근에는 메타물질 개념을 프레즈넬 렌즈 설계에 도입하여 더욱 정교한 빔 제어가 가능한 메타표면 프레즈넬 렌즈에 대한 연구도 진행되고 있다.(Fresnel Technology, 2019)

메타렌즈는 나노 구조를 이용하여 빛의 위상을 제어함으로써 초박형 렌즈를 구현할 수 있는 차세대 광학 기술이다. 기존의 굴절 렌즈와 달리 평면 구조로 제작되어 초소형화와 경량화가 가능하며, 회절 한계를 극복할 수 있는

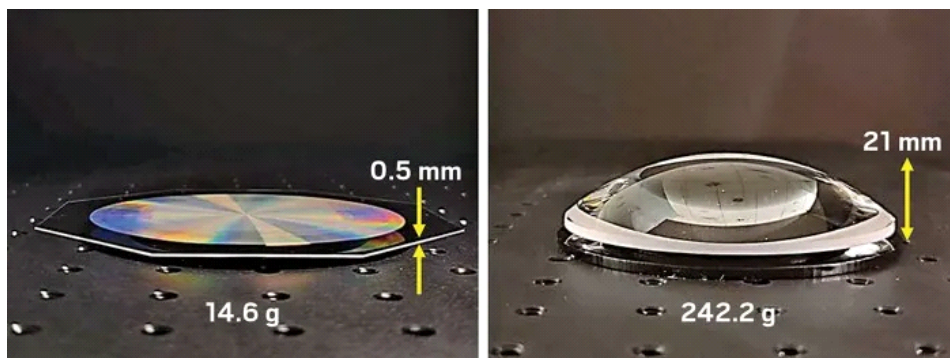
잠재력을 가지고 있다.

메타렌즈 기술은 현재 미국, 유럽, 중국 등 선진국을 중심으로 활발히 연구되고 있다. 메타렌즈는 아직 상용화 단계에 이르지지는 않았지만, 향후 카메라, 현미경, 증강현실 디스플레이 등 다양한 광학 시스템에 적용될 것으로 전망된다.

메타렌즈 시장은 아직은 초기 단계이지만 향후 빠르게 성장할 것으로 예상된다. 특히 5G 통신, 자율주행차, 의료영상 등 첨단 산업 분야에서 메타렌즈 수요가 증가할 것으로 예상된다.(Optics.org, 2019)

향후 나노 기술과의 융합을 통해 더욱 혁신적인 광학렌즈 기술이 개발될 것으로 예상되며, 이는 레이저 다이오드를 비롯한 광학 기반 산업의 발전을 더욱 가속화할 것이다.

그림은 메타렌즈와 기존의 볼록 렌즈(convex lens) 사이의 두께와 무게 비교한 것이다. 해당 렌즈는 [그림 2-20]과 같이 기존의 렌즈에 비해 약 15배 얇고 40배 가볍다고 한다.(The latest trends in nanophotonics, 2024)



[그림 2-20] 메타렌즈와 볼록렌즈의 두께와 무게 비교

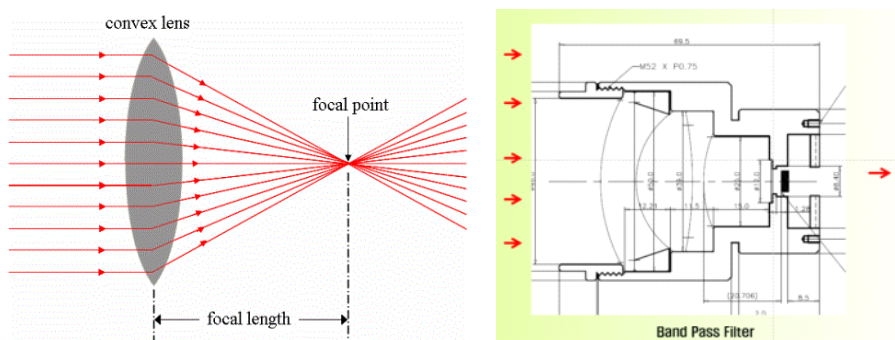
(2) 광학렌즈 선행연구 사례

국가R&D연구보고서[글로벌 수준의 휴대형 원거리 천연가스 누출검지장비 개발]에서 볼록렌즈 제작에 대하여 다음과 같이 설명하고 있다.

(가) 볼록렌즈 개념도와 설계도

설계도의 주안점은 [그림 2-21]과 같이 렌즈의 곡률과 두께를 최적화하여

최대한의 빛 전달 효율을 확보하는 것이다. 이를 통해 감지기의 감도를 높이고, 다양한 환경에서 일관된 성능을 발휘할 수 있도록 한다. 또한, 렌즈의 소재 선택과 코팅 기술은 빛의 산란과 반사를 최소화하여 측정 정확도를 향상시키는 데 중점을 둔다.



[그림 2-21] 볼록렌즈 개념도와 설계도

(나) 볼록렌즈 조립도

그림 [그림 2-22]는 완성된 광학렌즈에 들어가는 볼록렌즈를 나열한 조립도이다. 이는 여러 개의 렌즈를 정밀하게 배치하여 하나의 광학 시스템을 구성하는 방법을 보여준다. 각 렌즈는 특정한 역할을 하며, 서로 간의 간격과 각도 조절이 중요하다. 조립 과정에서는 렌즈가 흔들리거나 틀어지지 않도록 고정 장치가 사용되며, 이는 전체 시스템의 안정성을 보장한다. 조립 후에는 광학 축 정렬과 초점 맞추기가 필수적으로 수행되어야 하며, 이를 통해 최적의 광학 성능을 확보한다.



[그림 2-22] 볼록렌즈 조립도

(다) 완성된 광학렌즈(볼록렌즈)

[그림 2-23]과 같이 완성된 광학렌즈는 5개의 렌즈를 사용한 복합적인 구조를 가지며, 각각의 렌즈가 서로 보완하여 전체 시스템의 성능을 극대화한다. 이 완성된 광학 시스템은 다양한 거리와 각도에서 메탄 누출을 감지할 수 있는 능력을 제공하며, 특히 원거리 감지에 탁월한 성능을 발휘한다.



[그림 2-23] 완성된 광학렌즈(볼록렌즈)

다) 광학 필터링 기술

레이저 다이오드는 다양한 산업 분야에서 광범위하게 활용되고 있는 핵심 광원 소자이다. 이러한 레이저 다이오드를 효과적으로 활용하기 위해서는 고품질의 광학계 구성이 필수적이며, 그 중에서도 광학 필터링 기술이 매우 중요한 역할을 한다.

(1) 특성에 따른 광학필터의 분류

광학 필터링 기술은 레이저 빔의 특정 파장을 선택적으로 투과 또는 반사시켜 원하는 광학적 특성을 얻는 기술이다. 이는 레이저 다이오드 시스템의 성능을 향상시키고, 다양한 응용 분야에 적합한 광특성을 구현하는 데 필수적이다. 주요 광학 필터링 기술로는 간섭 필터, 흡수 필터, 편광 필터 등이 있다.

간섭 필터는 다층 박막 구조를 이용하여 특정한 파장의 빛만을 선택적으

로 투과하거나 반사시키는 기술이다. 이는 정밀한 파장 선택성과 높은 투과율을 제공하여 레이저 다이오드 시스템의 스펙트럼 순도를 향상시키는 데 주로 사용된다. 최근 연구에서는 나노 구조를 이용한 메타표면 기반의 간섭 필터 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 이를 통해 더욱 compact하고 고성능의 필터링 시스템 구현이 가능해지고 있다.

흡수 필터는 특정 파장의 빛을 흡수하여 제거하는 기술로, 주로 레이저 다이오드의 잡음 제거나 원하지 않는 파장 성분을 차단하는 데 사용된다. 최근에는 양자점이나 2D 소재를 이용한 새로운 흡수 필터 소재 개발이 진행되고 있으며, 이를 통해 더욱 효율적이고 선택적인 파장 제어가 가능해지고 있다.

편광 필터는 특정 편광 방향의 빛만을 투과시키는 기술로, 레이저 다이오드 빔의 편광 특성을 제어하는 데 중요하게 사용된다. 최근 연구에서는 메타물질을 이용한 초박막 편광 필터 개발이 주목받고 있으며, 이를 통해 고집적 광학 시스템 구현이 가능해지고 있다.(RP Photonics, 2024)

(2) 광학필터링 기술동향

광학 필터링 기술의 최근 연구 동향을 살펴보면, 나노 포토닉스 기술을 활용한 고성능 필터 개발이 활발히 이루어지고 있다. 플라즈모닉 나노 구조를 이용한 초협대역 필터, 메타표면 기반의 다기능 필터 등이 개발되고 있으며, 이를 통해 레이저 다이오드 시스템의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 가능성이 제시되고 있다. 또한, 능동 제어 가능한 광학 필터 기술 개발도 주목받고 있다. 전기 광학 효과나 열 광학 효과를 이용한 튜너블 필터 기술이 연구되고 있으며, 이를 통해 레이저 다이오드 시스템의 유연성과 적응성을 크게 향상시킬 수 있다.

광학 필터링 기술은 레이저 다이오드를 이용한 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 한다. 광통신 분야에서는 파장 분할 다중화(WDM) 시스템에 사용되어 채널 간 간섭을 최소화하고 전송 효율을 높이는 데 기여한다. 산업용 레이저 가공 분야에서는 광학 필터링 기술을 통해 레이저 빔의 품질을 향상시키고 원하는 파장 대역만을 선택적으로 사용함으로써 가공 정밀도와 효율

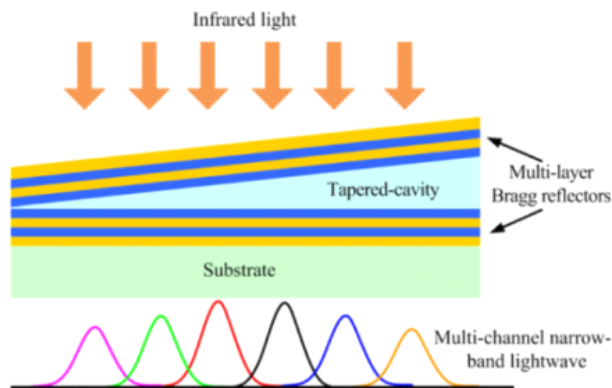
을 높일 수 있다.

결론적으로, 광학 필터링 기술은 레이저 다이오드를 활용한 다양한 산업 분야에서 핵심적인 역할을 수행하고 있으며, 나노 포토닉스, 메타물질 등 첨단 기술과의 융합을 통해 지속적으로 발전하고 있다.(The latest trends in nanophotonics, 2024)

(3) 레이저 메탄누출검지장비 적용필터 특징

1654nm를 사용하여 메탄을 검지하는 레이저 메탄검지장비의 경우, 주로 간섭 필터를 사용하는 것이 적합하다. 이는 정밀한 파장 선택성과 높은 투과율을 제공하여 레이저 다이오드 시스템의 스펙트럼 순도를 향상시키는 데 주로 사용된다.

메탄 검지에 사용되는 1654nm 파장은 매우 특정한 파장이므로, 이 파장만을 정확하게 선별하여 검출하는 것이 중요하다. 간섭 필터는 이러한 요구사항을 충족시킬 수 있는 가장 적합한 필터 유형이다. 흡수 필터나 편광 필터는 이 경우 파장 선택성이 충분하지 않거나 메탄 검지에 필요한 특정 파장을 효과적으로 분리하기 어려울 수 있다. 또한, 간섭 필터는 온도 변화나 입사각 변화에 따른 중심 파장의 이동이 상대적으로 작아 안정적인 성능을 제공할 수 있다. 이는 야외에서 사용되는 메탄 검지기의 신뢰성을 높이는 데 중요한 요소이다. 따라서 1654nm를 사용하는 레이저 메탄검지기에는 간섭 필터가 가장 적합한 선택이다.(mfgrobots.com, 2024)



[그림 2-24] 레이저 메탄검지기용 간섭필터 예시

제 3 장 Mini Flat type 소형화 메탄누출검지장비 개발

제 1 절 메탄누출검지장비의 구성 및 개발 프로세스

1) 메탄누출검지장비의 구성

Mini Flat type 소형화 메탄누출검지장비는 고감도 원거리 메탄 검출을 위해 개발된 휴대형 장비로, 주요 구성요소는 [표 3-1]과 같다.

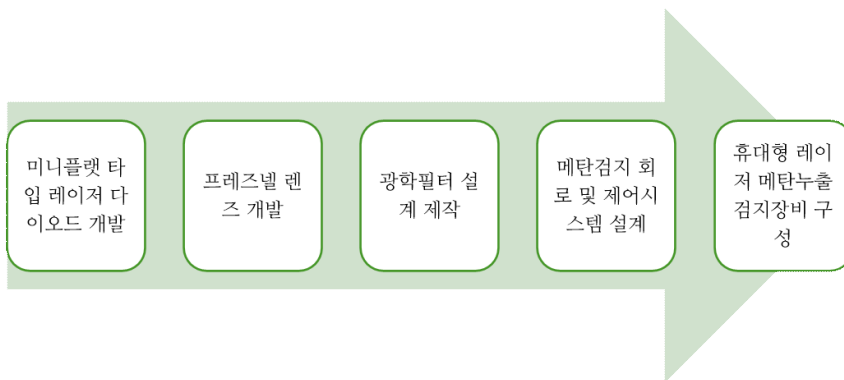
[표 3-1] 주요 구성요소

Mini Flat type 레이저 다이오드	장비의 핵심 광원 기술이다. 이 레이저 다이오드는 1654nm 파장의 단적외선을 방출하며, 이는 메탄 가스의 강한 흡수 밴드와 일치한다. 기존의 버터플라이 타입에 비해 크기와 무게가 대폭 줄어들어 장비의 소형화에 기여하며, 레이저 칩, 패키징 기술, 열 관리 시스템 등이 포함된다.
Fresnel Lens	장비의 광학 시스템을 최적화하는 중요한 기술이다. 프레즈넬 렌즈 기술을 적용하여 기존의 볼록렌즈를 대체함으로써, 장비의 전체적인 크기를 줄이고 휴대성을 향상시킨다. 이 렌즈는 송신부와 수신부에 각각 설치되어 레이저 빔의 효율적인 송수신을 담당한다.
광학필터	측정의 정확도를 높이고 외부 광원의 간섭을 최소화하는 중요한 요소이다. 메탄 가스의 1654nm 흡수 밴드에 최적화된 고성능 광학필터를 설계하고 제작하여, 메탄 가스의 정확한 검출을 가능하게 한다.

메탄검지 회로 및 제어시스템 설계	장비의 안정적인 동작과 높은 감도를 실현하기 위한 핵심 기술이다. 레이저 다이오드 구동 회로, 신호 처리 회로, 데이터 수집 및 분석 시스템 등을 설계하고 최적화하여, 주요 구성요소로는 Tx 구동 회로, Rx 신호 처리 회로, MCU 연결 회로 등이 포함된다.
휴대형 레이저 메탄누출검지장비 완성	앞서 개발된 모든 요소 기술들을 통합하여 완성된 시스템을 구축하는 과정이다. 이 단계에서는 각 구성요소 간의 호환성을 확보하고, 전체 시스템의 성능을 최적화하며, 사용자 인터페이스 설계, 외형 케이스 개발, 전원 공급 장치 최적화 등이 이루어진다.

2) 메탄누출검지장비 개발 프로세스

본 연구에서 개발하고자 하는 미니플랫타입 휴대형 레이저 메탄누출검지장비의 주요 개발 프로세스 진행도는 [그림 3-1]과 같고 내용은 [표 3-2]와 같다.



[그림 3-1] 개발 프로세스 진행도

[표 3-2] 개발 프로세스 내용

Mini Flat type 레이저 다이오드	소형화된 레이저 다이오드를 개발하여 장비의 크기와 무게를 줄이는 동시에 안정적인 성능을 확보하고자 한다. 이를 위해 기존의 버터플라이 타입 대신 미니플랫 타입 구조를 설계하고, 레이저 다이오드의 전기적 및 광학적 특성을 최적화하며, 열 관리 및 방열 설계를 개선한다..
Fresnel Lens	광학 렌즈를 소형화하여 장비 전체의 크기를 줄이고 휴대성을 높이는 것을 목표로 한다. 프레즈넬 렌즈 설계를 통해 기존 볼록 렌즈 대비 경량화 및 소형화를 실현하고, 렌즈 소재 및 코팅 기술을 연구하며, 광학 성능 테스트 및 조정을 수행한다.
광학필터	고성능 광학 필터를 설계하여 메탄 검출의 정확도를 향상시키고자 한다. 특정 파장대의 메탄 흡수 특성에 맞춘 필터를 설계하고, 필터 투과율 및 차단 범위를 최적화하며, 필터 제작 후 성능 검증 및 개선 작업을 진행한다.
메탄검지 회로 및 제어시스템 설계	안정적인 동작과 높은 감도를 실현할 수 있는 메탄 검지 회로와 제어 시스템을 설계한다. 이를 위해 메탄 검출을 위한 센서 회로를 설계하고 시뮬레이션하며, 제어 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어 통합을 진행하고, 신호 처리 알고리즘을 개발 및 테스트한다.

휴대형 레이저 메탄누출검 지장비 완성	모든 요소 기술을 통합하여 최종 장비를 구성하고 성능을 평가한다. 각 구성 요소의 통합 및 시스템 최적화를 수행하고, 종합적인 성능 테스트(거리, 농도, 환경 조건 등)를 실시하며, 사용자 피드백을 수집하여 최종 제품을 개선한다.
----------------------------------	--

이러한 프로세스를 통해 기존 제품에 비해 소형화되고 휴대성이 높아져 다양한 현장에서 효과적으로 사용할 수 있는 장비를 개발한다. 각 단계에서 철저한 테스트와 피드백 반응을 통해 장비의 신뢰성과 성능을 향상시킨다.

제 2 절 Mini Flat type 레이저 다이오드 개발

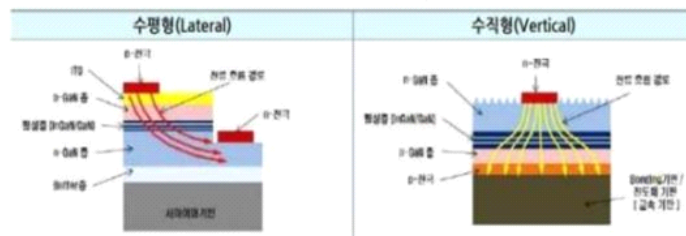
1) 적용 레이저 다이오드 특징

Laser Diode는 [그림 3-2]과 같이 일반적으로 에피(Epi), 칩(Chip), 패키지(Package), 모듈(Module) 및 시스템(System)기술로 분류한다.(중소기업기술 로드맵 2018-2020, 2017)

Epi Wafer	Chip	Package
Epitaxial 성장에 의해 만들어진 반도체 기판	전극을 형성하여 개별 칩으로 절단	칩과 리드를 연결하고 빛의 외부 방출을 위하여 칩 포장
		

[그림 3-2] 레이저 다이오드 기술분류

Laser Diode는 [그림 3-3]와 같이 칩의 구조에 따라 수평형(Lateral)과 수직형(Vertical)으로 분류한다. 칩의 구조에 따른 수직형의 경우, 에피면-다운(Epi-Side Down) 방식이라 불리며, 수평형(Epi-SideUp 방식)은 광 손실 및 열에 의한 신뢰성 저하 문제를 해결하기 위해 전극을 배면에 형성한 구조로, 칩 효율이 높아 주로 고출력 응용 분야의 Laser Diode에 적용되며, 본 연구에서 개발한 Laser Diode는 수평형 방식이다.



[그림 3-3] 칩 구조에 따른 분류

현재 CH₄(메탄) 센서는 1653.7nm 파장의 반도체 레이저를 사용하여 고 감도 가스 농도 측정을 수행한다. 이 센서는 레이저 다이오드의 구동 전류를 주기적으로 변화시켜 70-100ppm 범위의 주파수 변조를 한다. 변조된 레이저 빔이 메탄 가스를 통과할 때, 메탄 분자의 특정 흡수 라인을 스캔한다. 레이저 빔이 메탄 가스를 통과한 후, 검출기는 투과된 빛의 강도 변화를 측정하여 메탄 농도에 따라 특정 파장에서 형성되는 흡수 피크를 분석한다.

반도체 레이저는 온도에 따라 대략 90ppm-100ppm의 파장 변화를 보이므로 반도체 레이저의 온도를 정확히 설정하는 것이 중요하다. 그러나 반도체 레이저의 온도를 측정하는 써미스터¹³⁾ 소자 자체가 패키지 외부 환경의 온도 변화에 영향을 받으므로, 외부 환경 온도 변화에 따라 반도체 레이저 파장의 변화가 최소화 되어야 한다.

통상적으로 보급형의 TO-can형 패키지는 내부 공간의 협소로 써미스터, 반도체 레이저 등이 외부 환경과의 접촉거리가 짧아 외부 환경 온도 변화에 따라 민감한 파장 변화를 보이므로, 열전소자 내장형의 TO-can형 패키지는 외부 환경 온도 변화에 따른 파장 안정도 100ppm 이내를 확보하기가 어렵다. NEL등의 고가형 패키지는 부피 3cc 이상의 큰 패키지로 외부 환경과 써미스터, 반도체 레이저 사이의 거리가 멀어 외부 환경 온도 변화에 따른 반도체 레이저 파장의 안정화를 상대적으로 용이하게 구현할 수 있으나 버터플라이 패키지는 부피가 크며, 가격이 비싼 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 [표 3-3]과 같이 버터플라이 패키지의 3cc에 비해 1/10 부피인 Mini Flat형 패키지를 이용하여 외부 환경 온도에 따른 파장 안정도가 최소화된 패키지를 개발하였다.

13) 써미스터는 온도의 작은 변화에 비례하여 저항에 있어서 큰 변화를 보여주는 소결 반도체 물질로 구성된 온도 감지 소자이다. 써미스터는 보통 온도가 증가하면 써미스터의 저항이 감소함을 의미하는 음의 온도계수(negative temperature coefficient)를 가지고 있다.

[표 3-3] 개발 다이오드와 기존 기술과의 비교

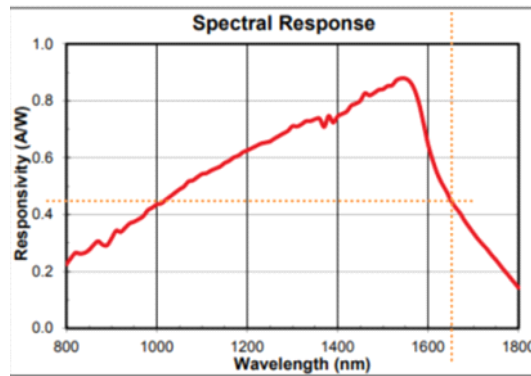
구분 (비교지표)	Butterfly Type	Can-type	Mini Flat Type
그림			
크기 (사이즈)	크다:소형기기에 적용불가	작다:소형기기에 적합	작다:소형기기에 적합
파장의 안정화	파장의 안정화 구현은 가능하나 부피가 크고 가격이 비싸다	내부 공간이 협소하여 외부 온도 변화에 의한 파장 안정화 구현이 어렵다	부피가 작으면서 파장의 안정화 구현이 가능하다
집광렌즈	별도의 외부 집광렌즈 필요	별도의 외부 집광렌즈 불필요	별도의 외부 집광렌즈 불필요
Monitor PD	내부에 존재	외부에 별도 장치 필요	내부에 존재

2) CH₄ 센서용 광원 블록 설계 및 제작

본 개발에 있어서는 작고 평평한 형태의 Mini Flat형 광원 패키지를 만든다. 이 장치는 안정적인 빛을 내보내며, 빛이 곧게 뻗어나가도록 설계된다. 이 기술을 이용해 가스를 감지하는 센서에 사용할 수 있는 광원 장치를 만든다. 이렇게 만들어진 작고 성능 좋은 광원 장치는 가스 센서의 정확도를 높인다. 이러한 개발의 결과물으로써, CH₄(메탄가스)용 1653.7nm 발진 파장 광원의 시제품을 개발하고 단위 부품 기술, 파장 안정화 구도 개발, 조립 기술 개발을 하여 단위 광소자 수준의 구현을 한다.

가) LD chip 특성설계 및 구입

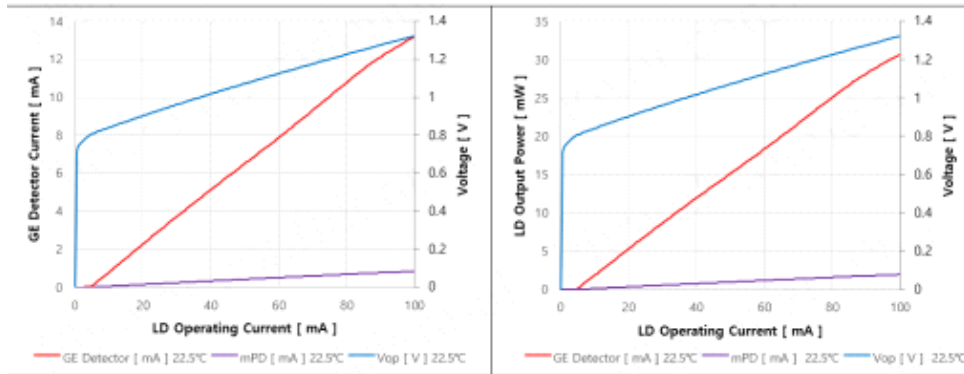
먼저 LD Chip의 출력을 확인하기 위해서는 적절한 Detector가 필요하며 이에 GE Detector를 선정하였으며 파장에 따른 Responsivity값에 따라 보정하여 Power를 구한다. [그림 3-4]은 광 검출기의 스펙트럼 응답을 나타내고 있다. X축은 파장을 나노미터 단위로 표시하며, 800nm에서 1800nm까지의 범위를 나타낸다. Y축은 감응도를 암페어/와트 단위로 나타내며, 0에서 1.0까지의 범위를 보여준다. 그래프를 살펴보면, 감응도는 약 800nm에서 시작하여 점차 증가하다가, 약 1600nm 부근에서 최대값에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이후 파장이 증가함에 따라 감응도는 감소하는 경향을 보인다. 이러한 스펙트럼 응답 특성은 광검출기가 특정 파장 범위에서 얼마나 효율적으로 빛을 감지할 수 있는지를 보여주며, 최대 감응도를 나타내는 파장 부근에서 가장 민감하게 반응한다는 것을 의미한다.



[그림 3-4] 광검출 스펙트럼 반응

[그림 3-5] 왼쪽 그래프에서 빨간선은 GE 검출기의 전류를 나타내며, LD 작동 전류의 증가에 따라 거의 선형으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 파란색 선은 VPD를 나타내며, 이 또한 LD 작동 전류가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 보라색 선은 MPD의 전류를 나타내는데, 변화가 거의 없다. 오른쪽 그래프에서는 빨간색 선이 LD 출력 전력을 나타내며, LD 작동 전류가 증가할수록 출력 전력이 증가하는 것을 보여준다. 이와 함께 파란색 선으로 표시

된 VPD도 LD 작동 전류가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이 두 그래프는 ILV(전류-광출력-전압) 특성을 측정한 결과와 Responsivity(감응도)를 보정한 결과를 비교하여 나타낸 것으로 이러한 분석을 통해 레이저 다이오드의 효율성과 감응도를 평가할 수 있다.

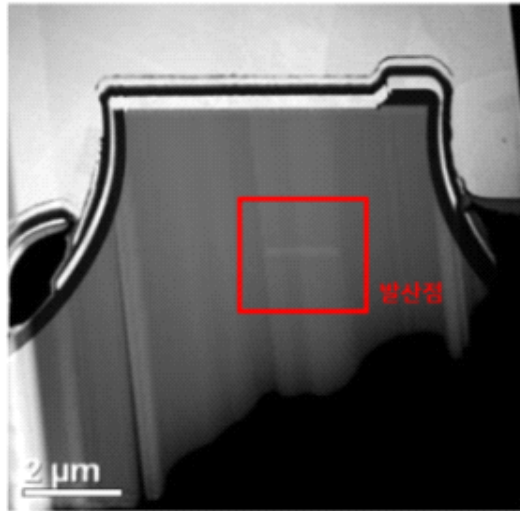


[그림 3-5] 측정값(左), Responsivity 보정(右)한 ILV그래프

InP계 단일 모드 반도체 레이저는 반도체 활성층 내부에 격자를 만들어, 특정 파장만 보강 간섭을 일으켜 단일 모드로 발진하게 하는 구조를 가진다. 파장 안정화를 위해 LD 칩에 히터가 내장된 칩 메이커를 선정한다.

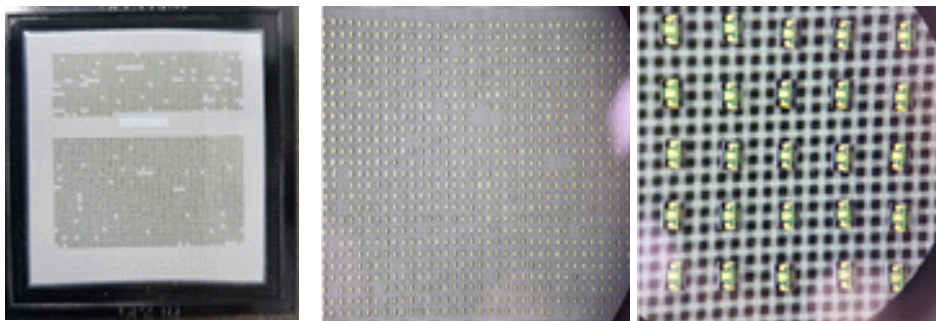
[그림 3-6]과 같이 TEM 분석을 통해 양자우물(QW)¹⁴⁾의 위치를 정확히 파악하여 발산점을 확인하고, LD 서브마운트를 고려하여 평행광 렌즈와 정렬할 수 있는 발산점이 되도록 설계를 진행하였다.

14) 양자우물은 레이저 다이오드의 핵심 구성 요소로, 빛의 생성과 증폭이 일어나는 활성 영역 역할을 한다.



[그림 3-6] LD Chip TEM 분석 자료

Laser Diode 칩은 [그림 3-7]과 같이 특정 파장대를 생성하도록 설계되어 있으며, 센서용 광원 블록에 사용된다.

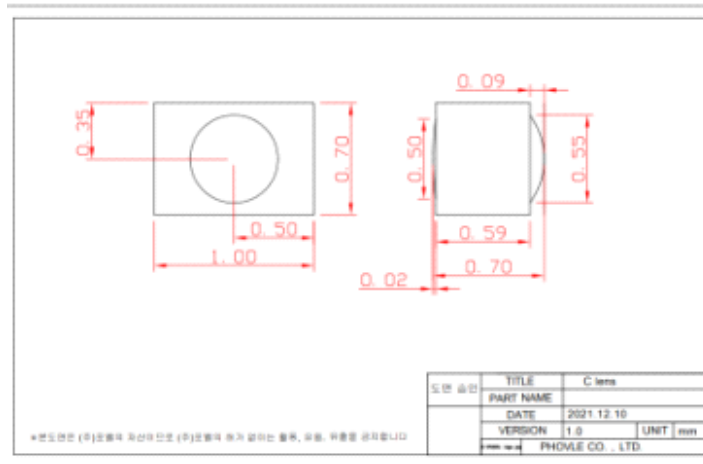


[그림 3-7] LD CHIP [웨이퍼(WAFER)]

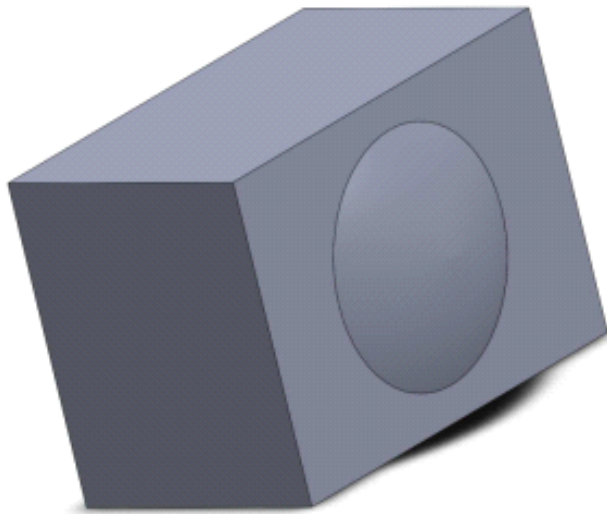
나) 평행광 렌즈설계 및 제작

평행광 렌즈는 LD 칩에서 발산되는 레이저 빛을 평행하게 만드는 역할을 한다. 이 렌즈는 LD 칩의 발산점과 발산각(NA)에 맞춰 설계되어야 하며, 정확한 평행광을 생성하기 위해 정밀하게 정렬되어야 한다. 이를 위해 렌즈는 바닥으로부터 일정한 간격을 유지해야 하며, 자동 조립 공정에 적합한 외형을

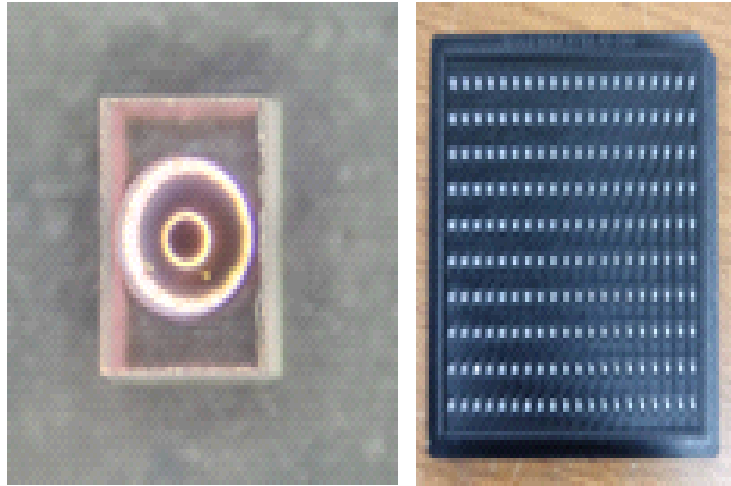
가져야 한다. 이러한 특성 때문에 평행광 렌즈는 센서용 광원 블록에서 필수적인 구성 요소로 사용된다. [그림 3-8], [그림 3-9], [그림 3-10]은 평행광 렌즈 도면과 평행광 렌즈 3D 시뮬레이션, 제작된 평행광 렌즈이다.



[그림 3-8] 평행광 렌즈 도면



[그림 3-9] 평행광 렌즈 3D 시뮬레이션

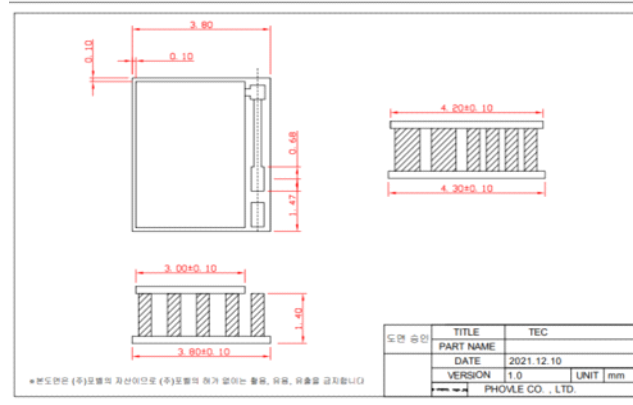


[그림 3-10] 평행광 렌즈

다) 열전소자 설계 및 제작

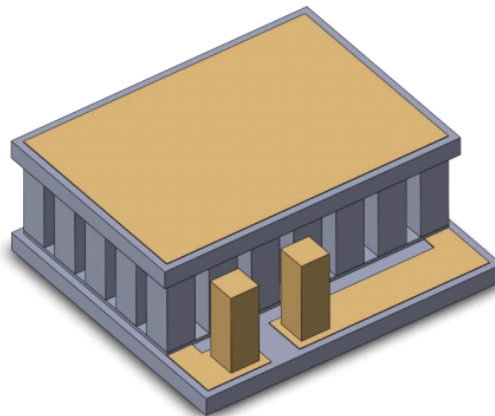
열전소자는 외부 운용 온도를 포함하여, 레이저 다이오드 칩에서 발생하는 발열량, 외부 환경 온도에 따른 패키지 하우징과 열전소자 상판부의 열 교환, 열전소자 상판부의 각 부품을 외부와 전기 연결하는 전기선에 의한 열 교환 등을 고려하여 최적의 디자인을 설계한다.

열전소자는 [그림 3-11]과 같이 레이저 다이오드 칩의 높이, 히트 spread 를 위한 서브마운트, 그리고, 레이저 다이오드 칩에서 발산광 형태로 방출되는 레이저 빛을 수렴 광으로 변형시키는 렌즈의 높이를 고려하여, 패키지의 출사면의 중심부에서 레이저 빛이 방출될 수 있도록 높이가 설계되어야 하며, 열전소자의 면적은 상부에 배치되는 LD Chip, 평행광 렌즈, 45도 빔스플리터, 2개의 mPD, 아이솔레이터, Jumper등을 장착 및 배열할 수 있으며, 열전소자의 소모 전력이 최소화가 될 수 있도록 최적의 열 설계를 실시한다(이종진 외, 2004)

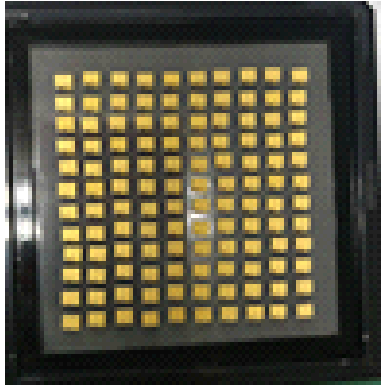


[그림 3-11] 열전소자 도면

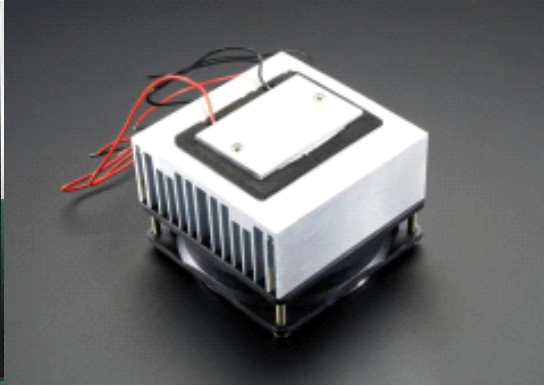
열전소자는 펠티에 효과를 활용하여 열을 흡수하거나 방출하는 장치로, 전류의 방향에 따라 흡열 또는 발열을 수행한다. 이 소자는 센서용 광원 블록에서 중요한 역할을 한다. 전류가 한 방향으로 흐르면 열을 흡수하여 냉각 효과를 제공하고, 반대 방향으로 흐르면 열을 방출하여 가열 효과를 준다. 이러한 특성 때문에 열전소자는 온도 조절이 필요한 다양한 응용 분야에서 사용된다. 특히, 정밀한 온도 제어가 필요한 센서 시스템에서 필수적인 구성요소로 자리 잡고 있다. [그림 3-12], [그림 3-13], [그림 3-14]는 열전소자 3D 시뮬레이션과 열전소자, 열전소자 방열판과 보조팬이다.



[그림 3-12] 열전소자 3D 시뮬레이션



[그림 3-13] 열전소자

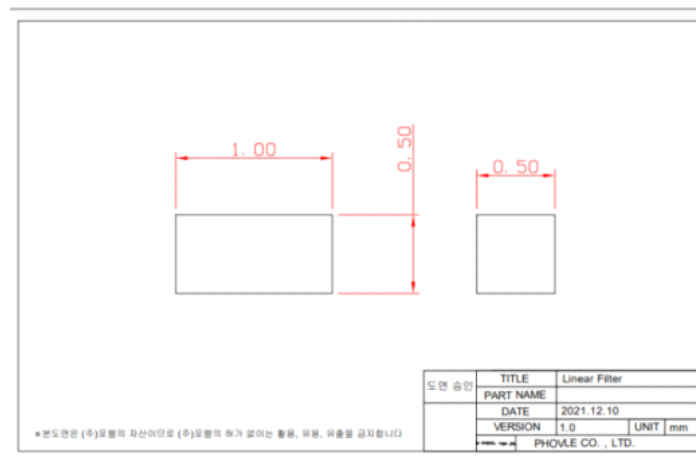


[그림 3-14] 열전소자 방열판과 보조팬

3) 파장 안정화 모니터 PD 블록 설계 및 제작

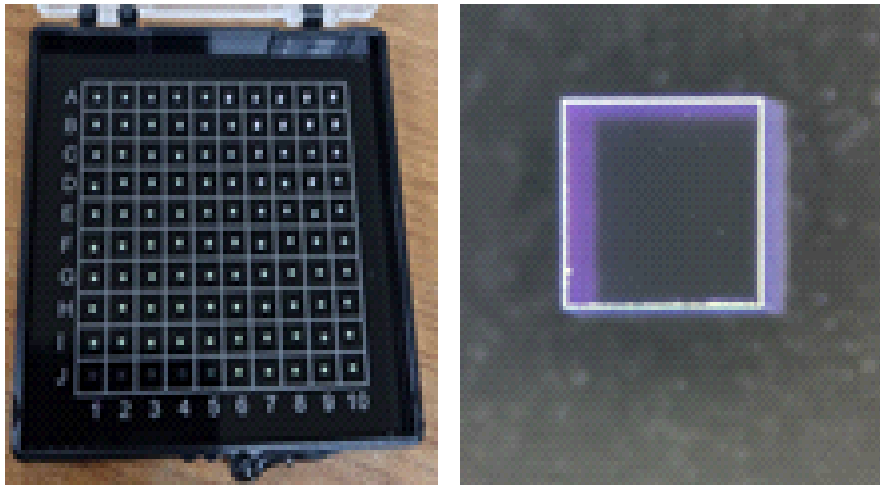
가) 파장 측정용 필터 설계 및 제작

파장측정용 필터는 [그림 3-15]와 같이 필요한 파장영역을 위해 설계된 필터로 동일한 광원으로부터 발생한 광을 2개의 mPD로 수신하여 그 비율을 찾는 용도로 사용된다. 이때 mPD1은 빛을 그대로 수신하고 mPD2는 필터에 의해 변형된 빛을 수신한다. 파장측정용 필터는 파장에 따라 민감한 투과율 변화를 보이는 필터로 파장 안정화 블록에 사용된다.



[그림 3-15] 파장 측정용 필터 도면

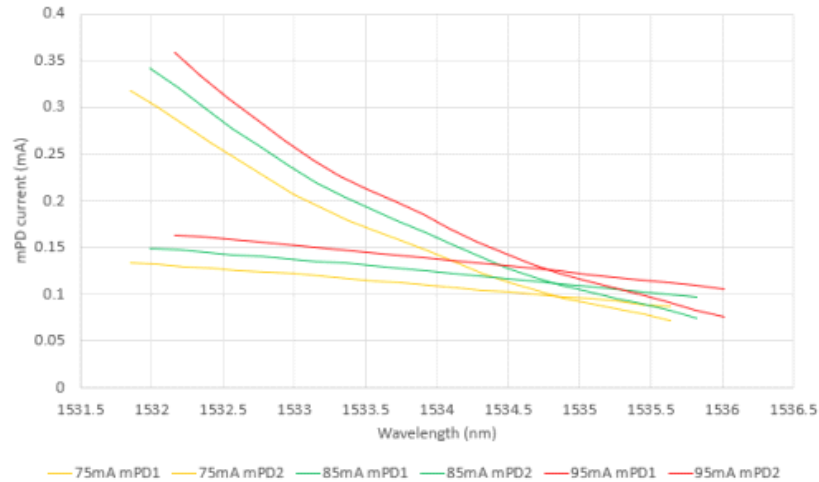
[그림 3-16]은 필터의 크기와 필터 배열을 나타내고 있다. 필터의 크기는 1.00mm x 0.50mm 이며, 필터의 배열은 격자 형태로 배열되어 있어서 다양한 파장을 동시에 측정할 수 있도록 설계되었다. 파장 측정용 필터는 정확한 광학 분석을 위해 중요한 역할을 한다.



[그림 3-16] 파장 측정용 필터

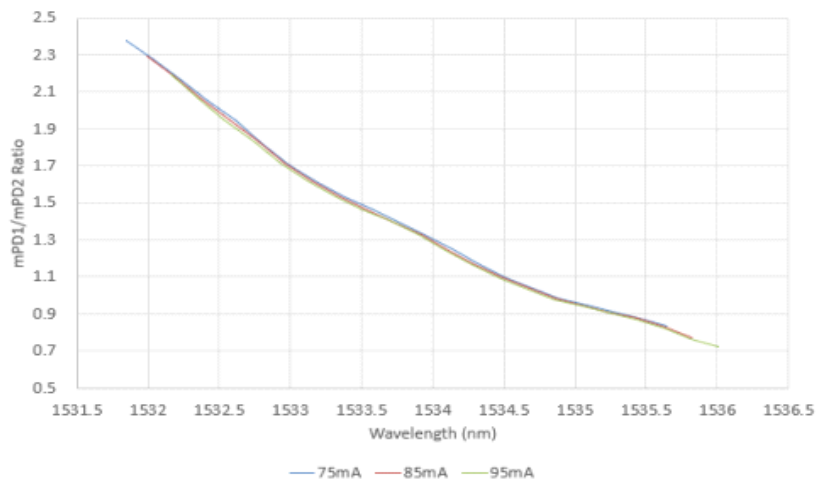
나) 광파워 및 파장 측정을 위한 파장 안정화 블록 설계 및 제작

파장 안정화 장치는 [그림 3-17]에서 보이는 것처럼 레이저 빛을 두 갈래로 나누어 작동한다. 한 갈래의 레이저 빛은 모니터 포토 다이오드(mPD1)로 직접 입사시키고, 다른 갈래는 파장에 민감한 투과율 변화를 보이는 필터를 거쳐 모니터 포토 다이오드(mPD2)로 입사시킨다. 이때 mPD1과 mPD2를 흐르는 전류의 비율은 필터의 파장에 따른 투과율에 비례하게 된다. 이를 통해 레이저 빛의 파장을 측정할 수 있으며, 이 비율을 유지하여 원하는 파장으로 광을 고정(locking)할 수 있다. 또한, 필터의 특성을 최적화하기 위해 필터를 지나는 광이 평행광이 되도록 설계한다. [그림 3-17]은 우선적으로 파장 밴드 범위를 확대 적용한 그래프이다.



[그림 3-17] 파장 안정화 블록으로 측정된 파장 그래프

[그림 3-18]은 LD 칩의 구동 전류를 고정한 상태에서 열전소자를 사용해 온도를 증가시키며 측정한 결과를 보여준다. 온도가 상승하면 레이저의 파장이 길어지고 출력 파워는 감소하는 경향을 보인다. 그래프에서 선형적으로 완만하게 감소하는 선은 mPD1을 나타내며, 이는 LD 출력의 감소를 의미한다. 반면, 조금 더 가파르게 감소하는 선은 mPD2를 나타내며, 이는 LD 출력 감소에 필터에 의한 추가 감소가 더해진 결과이다.



[그림 3-18] 파장 안정화 블록으로 측정한 mPD1/mPD2 비율

각각의 LD 구동조건이 달라지더라도 같은 Sample에서 측정된 mPD1/mPD2의 비율은 일정하게 유지된다. 즉 2개의 mPD의 비율이 필터의 특성을 나타내게 된다. PKG¹⁵⁾ 외부로 방출되는 Main 출력으로 파장을 확인하여 LD의 구동전류와 열전소자의 온도를 제어하여 원하는 출력/파장조건에서의 mPD1/mPD2 비율값을 확인 기록하고 실제 Locking LD 구동할 때는 열전소자 제어를 써미스터 값이 아닌 mPD1/mPD2 비율값 POD¹⁶⁾을 조절함으로써 일정한 파장을 유지할 수 있다. [그림 3-19]는 45도 빔스플리터는 레이저 빛을 45도 방향으로 굴절시키는 미러로, 파장 안정화 블록에 사용된다. 이 구성 요소는 빛의 경로를 조절하여 원하는 방향으로 빛을 이동시키며, 파장 안정화에 중요한 역할을 한다.

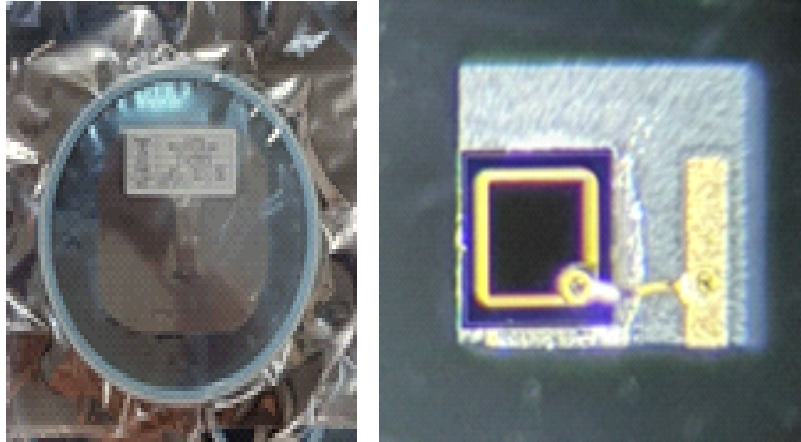


[그림 3-19] 빔스플리터

모니터 PD(포토다이오드)는 빛을 받으면 전류가 흐르는 다이오드이다. 이는 파장 측정용 필터와 병행하여 사용되며, 파장 안정화 블록에서 중요한 역할을 한다. 모니터 PD는 빛의 강도를 전기 신호로 변환하여 정확한 측정을 가능하게 한다. ([그림 3-20] 참조)

15) package

16) Photodiode Output Difference



[그림 3-20] 모니터 PD

4) 패키지 하우징 제작

광원 패키지는 광원 블록과 파장 안정화 블록을 포함하여 설계 및 제작한다. 열전소자와 파장 안정화 장치의 규격을 고려하여 세라믹 피드스루(ceramic feedthrough)¹⁷⁾ 패키지 하우징을 설계하고 제작한다. 또한, 패키지 하우징에 적합한 씰링 캡을 설계하고 제작한다. [그림 3-21]은 반도체 레이저 다이오드 칩의 파장을 안정화시키기 위해 표준시료가 장착된 구조의 반도체 레이저 다이오드 패키지 구조이다.

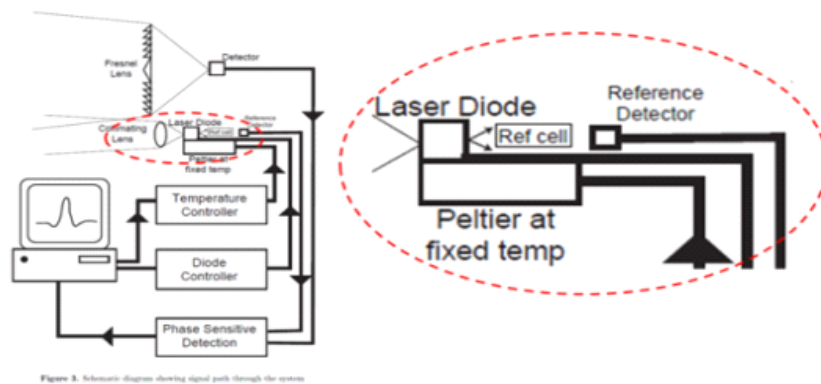


Figure 3. Schematic diagram showing signal path through the system

[그림 3-21] 반도체 레이저 다이오드 패키지 구조

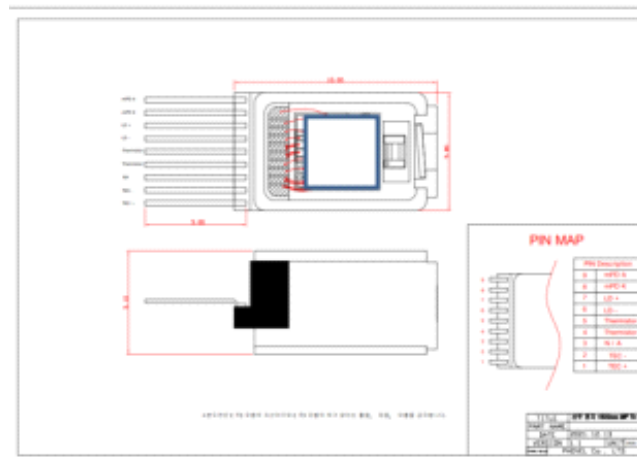
17) 전기 신호나 전력을 전달하면서 동시에 기밀성(hermeticity)과 전기적 절연을 유지하는 중요한 부품

다이오드 컨트롤러는 레이저 다이오드를 구동하기 위한 전류를 인가한다. 온도 컨트롤러는 열전소자를 구동하는 데 필요한 전류를 제공한다.

위상 감지 검출은 mPD1과 mPD2를 사용하여 발진 파장을 확인하는 역할을 한다. 다이오드 컨트롤러를 통해 레이저를 발진시킨 후, 온도 컨트롤러로 레이저 다이오드 칩의 외부 환경을 조절한다. 그런 다음, 위상 감지 검출을 통해 발진 파장을 유추하고, 이를 바탕으로 다이오드 컨트롤러나 온도 컨트롤러를 사용하여 원하는 파장대를 유지한다.

Mini Flat Housing은 TEC(열전소자)에서 발생하는 열을 효율적으로 외부 케이스로 전달하는 열 경로를 제공한다. 또한 내부의 부품들을 안전하게 보호하며, 내부의 전기적 소자들을 외부와 전기적으로 연결 할 수 있는 기능을 제공하며 부품 동작을 위한 충분한 전극수를 갖는 피드수로 [그림 3-22]와 같이 mPD2개, LD, Themistor, TEC를 구동하기 충분한 전극을 가지고 있는 PKG 전극 패드 광이 출력될 수 있는 적절한 위치/크기의 Window가 설계되어야 한다.

[그림 3-22]는 광원 패키지 하우징의 구조를 상세히 보여준다. 도면에는 핀 배열과 하우징의 외형이 표시되어 있다. [그림 3-23]은 실링캡의 구조를 나타낸다. 실링캡은 광원 패키지의 상단을 덮어 외부와의 접촉을 차단하는 역할을 한다. 도면에서는 실링캡의 크기와 두께가 명시되어 있다.



[그림 3-22] 광원패키지 하우징 도면

[그림 3-25]와 [그림 3-26]은 이러한 방법으로 제작된 레이저 다이오드와 이를 장비에 적용한 모습을 보여준다.



[그림 3-25] 완성된 Laser Diode



[그림 3-26] 장착된 Laser Diode

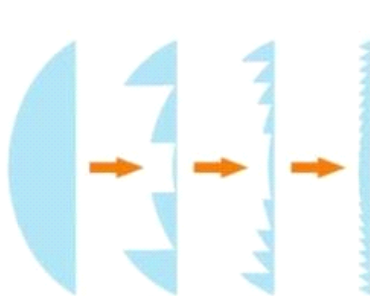
제 3 절 Fresnel Lens 개발(광학렌즈 소형화)

제품의 성능을 향상시키기 위해서는 반사되어 되돌아오는 검지신호의 수광부 렌즈에서의 집광력이 중요하다. 기존의 레이저 메탄누출 검지기는 볼록 렌즈와 오목렌즈를 5겹으로 조합해서 유리 재질 렌즈의 n 차 설계방식으로 광학계를 사용하였으며, 투과율은 97%를 나타내었다.

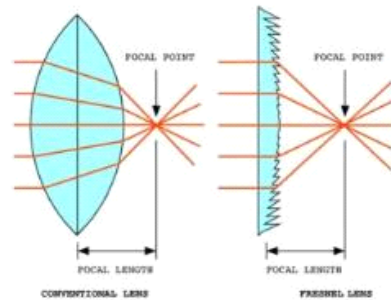
그러나 이러한 방법으로 구면 수차를 줄인 광학계는 렌즈의 두께가 매우 두껍고 무거워진다. 또한 렌즈 고정용 케이스의 결합에 의해 광학계 시스템에 높은 하중이 발생하여 부피가 크게 되었다. 이는 광학계를 소형 경량화 해야 하는 휴대형 장비에 있어서 큰 단점으로 작용하였다.

이러한 이유로 렌즈의 경량화 및 집광력을 위한 다각적인 연구가 진행되고 있다. 그중에서 프레즈넬 렌즈를 이용한 집광 시스템이 대표적인 경우이다.

[그림 3-27], [그림 3-28]과 같이 프레즈넬 렌즈는 얇은 평면의 광학렌즈로서 좁고 작은 원형의 돌기들로 이루어져 있고, 각각의 돌기들은 빛을 굴절시키는 개별적인 렌즈 역할을 하여서 구면수차를 줄일 수 있다. 이에따라 프레즈넬 렌즈는 부피와 무게가 적으면서 집광 및 시준¹⁸⁾에 맞는 대형 광학계 분야에까지 응용되어서 적용되고 있다(남현, 2021)



[그림 3-27] 볼록렌즈→
프레즈넬 렌즈(평면렌즈)로 변경



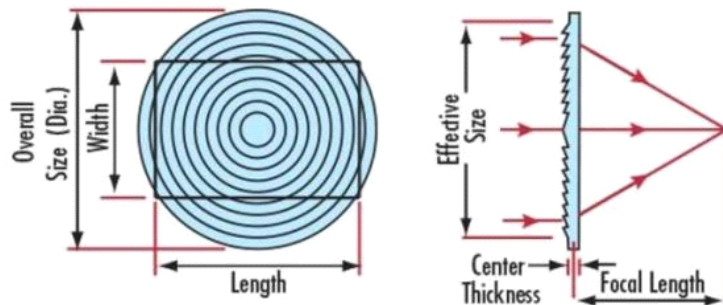
[그림 3-28] 볼록렌즈와 프레즈넬
렌즈의 차이

18) 조준기로 평행을 만드는 일

1) 프레즈넬 렌즈의 정의

프레즈넬 렌즈는 집광 및 시준을 목적으로 광선 제어 기여도가 낮은 내부의 부피를 제거하고, 남은 곡면 돌기를 이어붙인 형태의 렌즈를 말한다.

양의 굴절능을 가지는 볼록 렌즈는 물측 초점에 위치한 점광원의 광선속을 시준시켜주며, 반대로 평행광이 입사하면 상측 초점으로 모아 주게 된다. 이때, 렌즈의 곡면이 구면인 경우 평행광선이 정확히 한 점에 맺히지 않는 것을 구면수차라고 하며, 구면수차는 구면 렌즈의 입사각에 따라 굴절력이 다르기 때문에 발생하는 필연적 오차이다. ([그림 3-29] 참조)



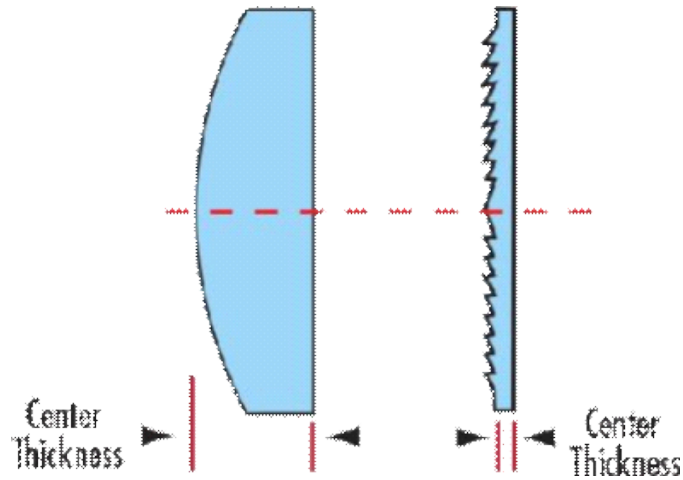
[그림 3-29] 프레즈넬 렌즈 정면과 측면

이는 렌즈의 계면을 비구면으로 가져옴으로써 해결할 수 있지만 종구면 수차를 제거한 비구면 렌즈는 두께가 매우 두꺼워지기 때문에 광학계 시스템에 높은 하중을 주고, 부피를 많이 차지하게 된다. 이는 광학계의 소형 경량화가 요구되는 경우에는 매우 큰 단점이다. 그러나 프레즈넬 렌즈는 소자의 굴절력은 유지하면서도 불필요한 체적을 줄임으로써 광학계의 무게와 부피와 획기적으로 줄일 수 있다. 프레즈넬 렌즈의 평면은 작고 좁은 원형의 돌기들로 이루어져 있는데, 각 돌기를 groove¹⁹⁾ 라고도 칭한다. 각각의 돌기들은 빛을 굴절시키는 개별 렌즈들이라 할 수 있어서 정교한 광학계 설계가 가능하다. 이는 집광 및 시준을 목적으로 하는 대형광학계에서 장점을 최대화 할 수 있으며, 태양광 집광, 등명기, 항공장애 표시등과 같은 분야에 적용되고 있다.

19) Groove는 회절 격자(diffraction grating)의 표면에 있는 홈이나 골짜기를 의미한다. 회절 격자에서 groove는 빛을 원하는 방식으로 회절시키는 핵심 요소로, 분광학, 통신, 레이저 기술 등 다양한 분야에서 중요하게 활용된다.

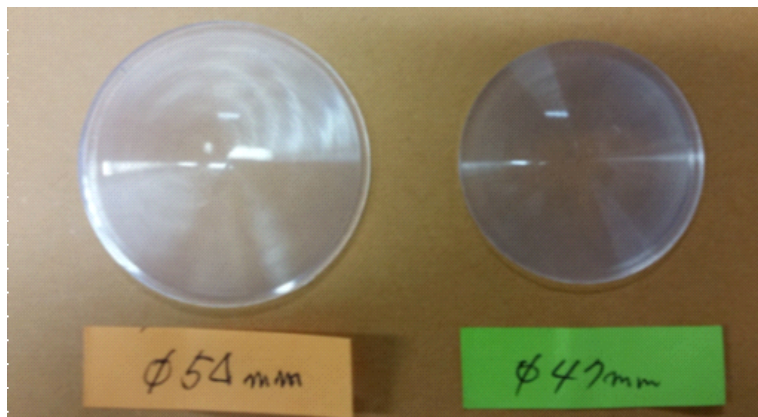
근래, 프레즈넬 렌즈는 그 목적에 따라 렌즈의 재질, groove의 형상과 개수, 크기, 성능 등 다양한 형태로 설계되고 있고, 기존의 구면 렌즈의 부피, 무게, 비용을 개선하면서 광효율을 높이는데 큰 효과가 있다.

프레즈넬 평면 판 렌즈를 사용하면 [그림 3-30]은 렌즈의 두께를 작게 하면서 구면 수차를 좋게 할 수 있다. 프레즈넬 렌즈는 볼록렌즈와 같은 일반 광학 렌즈에 비해 대량생산이 용이하고, 가격이 매우 싸다.



[그림 3-30] 구면렌즈와 프레즈넬 렌즈의 두께차이

[그림 3-31]은 프레즈넬 렌즈를 50 ϕ 와 47 ϕ 로 제작한 것이다.



[그림 3-31] 두 종류 프레즈넬 렌즈 제작

2) 프레즈넬 렌즈의 재료

프레즈넬 렌즈는 [표 3-4]와 같이 주로 SOG(Silicon on Glass)와 PMMA(Poly Methyl Methacrylate) 두 가지 유형으로 분류된다. SOG 렌즈는 저철분 강화유리 기판에 고투과율 광학실리콘을 도포한 후 회전절삭 방식으로 가공하여 제작된다. 광학용 실리콘은 우수한 내후성, 낮은 표면장력, 무독성, 내산화성, 열안정성 등의 특성으로 인해 광학렌즈 소재로 적합하다.

그러나 SOG 렌즈는 고비용, 중량, 복잡한 가공 과정으로 인해 휴대형 검지기 광학계에 적용하기에는 제한점이 있다. 반면, PMMA 렌즈는 표면에 돌출된 평면 또는 오목한 박판 구조를 이용하여 광선을 굴절시키는 방식으로 설계된다. 이 방식은 에너지 밀도를 효과적으로 증가시킬 수 있으며, 소형화, 경량화, 저비용, 대량생산이 가능한 장점을 가지고 있다. 따라서 PMMA 렌즈는 휴대형 광학기기에 적합한 선택이다.(Xie, W. T., 2011)

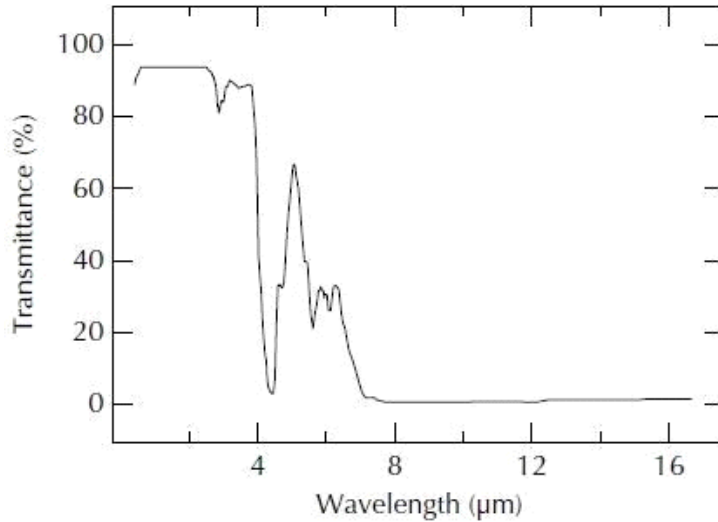
[표 3-4] 렌즈의 종류와 특성

렌즈종류 특성	SOG 렌즈	PMMA렌즈
내열성	최대 180℃까지 견딤	최대 60℃까지 견딤
내구성	우수한 기후 저항 특성	낮은 내구성
광학적 특성	높은 굴절률과 투과율	일부응용에서 제한적
제조 및 가공	복잡한 제조 과정	상대적으로 쉬운 가공
비용	높은 제조 비용	상대적으로 저렴
유연성	경직됨	유연함

3) 프레즈넬 렌즈를 적용한 광학계 제작

본 논문에서는 기존 구면렌즈들의 결함을 대체하기 위한 프레즈넬 렌즈의 재료로 Fresnel Technologies 사의 POLY IR5를 선정하였다. [그림 3-32]와 같이 이 재료는 자외선에 안정적인 PMMA 재질로 1.43의 굴절률을 가지고

있으며, 메탄의 고유 파장대인 1654 μ m 파장대에서 90%이상의 투과율을 나타낸다.(Fresnel Technology, 2019)

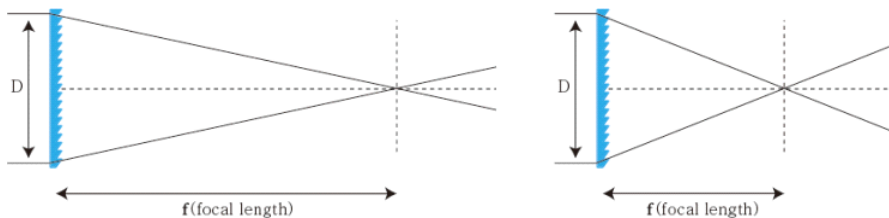


[그림 3-32] OLY IR5 재료의 측정 파장대 및 투과율 그래프

F-number($f/\#$)은 렌즈의 밝기를 나타내는 값으로, 초점거리(f)에 반비례하고 렌즈 구경(d)에 비례한다.

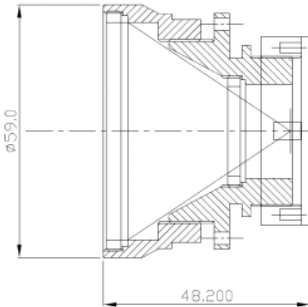
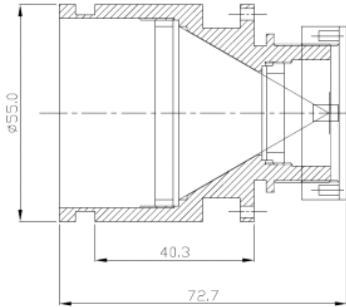
$$F-number(f/\#) = \frac{f}{d} \quad (\text{식 3-1})$$

[그림 3-33]과 같이 F-number($f/\#$)값이 작을수록 밝기가 커서 빛을 받아 드리는 범위가 넓고 상이 작은 반면, F-number($f/\#$)값이 커질수록 시각의 범위는 좁게, 상은 크게 맞춰진다. 이에 휴대형 레이저 메탄 검지기에서 수광부에서 받아들이는 신호는 강해지지만 많은 노이즈가 발생하고, 반대로 신호가 작으면 검지능력이 떨어지기 때문에 적절한 F-number를 찾기 위해 프레즈넬 렌즈의 구경과 초점거리를 다양하게 설계하여 최적의 사양으로 적용하였다.



[그림 3-33] 렌즈 구경이 같고 초점거리가 다른 경우

[그림 3-34]는 50 $\varnothing$ /FL38mm/F0.8로 제작한 프레즈넬 렌즈이다.

[METHAN DETECTOR OPTIC SYSTEM ASS'y - FRESNEL]		METHAN DETECTOR OPTIC SYSTEM ASS'y - FRESNEL FL=38]	
			
시제품 도면		최종 도면	
			
전면	후면	측면	

[그림 3-34] 프레즈넬 렌즈 설계 및 제작

제 4 절 광학필터 설계 제작

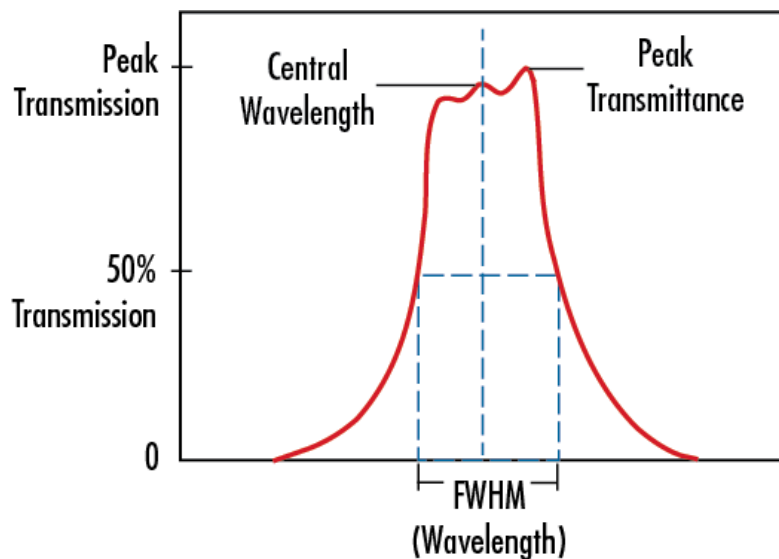
1) 광학필터 설계

광학 필터는 스펙트럼의 일부는 선별적으로 투과시키고 나머지는 차단시키는 역할을 하는 광학 부품이다. 필터는 기타 광학 부품과 스펙 면에서 많은 부분이 동일하긴 하지만 필터에만 해당하는 몇 가지 고유의 스펙이 존재한다. [그림 3-35]에서 보는 바와 같이 중심 파장(Central Wavelength)은 bandpass filter의 최대 투과율, 또는 notch filter의 최대 반사율을 나타내는 데 사용된다. CWL은 사실 투과율이 최대 투과율의 50%인 파장 사이의 중심 점으로 정의된다.

대역폭(Bandwidth)은 필터를 통해 입사 에너지를 통과시키는 스펙트럼의 특정 영역을 나타내는 데 사용되는 파장 범위이다.

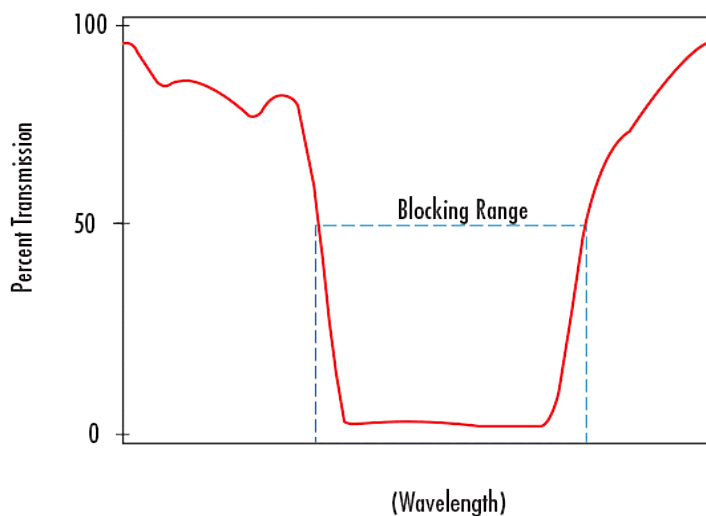
FWHM(반치전폭)²⁰⁾은 Bandpass filter가 투과시키는 스펙트럼 대역폭을 나타낸다. 이러한 대역폭의 상한과 하한은 필터가 최대 투과율의 50%를 달성하는 파장에서 정의된다. 예를 들어 필터의 최대 투과율이 90%라면, 필터가 45%의 투과율을 달성할 때의 파장이 FWHM의 상한과 하한을 규정한다. 10nm 이하의 FWHM은 좁은 대역으로 간주되어 대개 레이저 클리닝과 화학물 검출에 사용되며, 25-50nm의 FWHM은 머신 비전 용도에 주로 사용된다. 50nm 이상의 FWHM는 광대역으로 간주되어 주로 형광 현미경 검사에 사용된다.(Edmund Optics, 2024)

20) Full Width at Half Maximum



[그림 3-35] 중심 파장과 Full Width at Half Maximum 도해

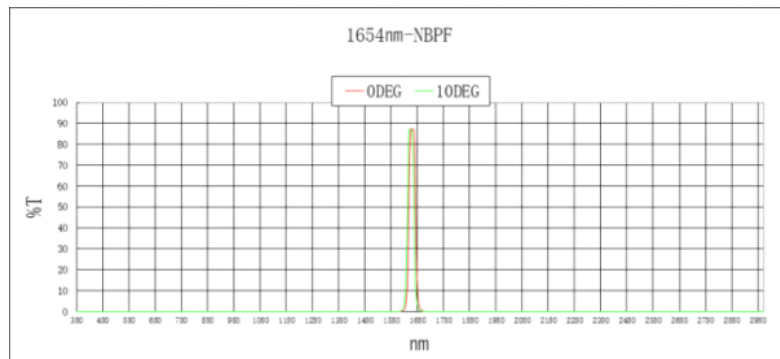
차단 범위 (Blocking Range)는 필터에 의해 감쇄되는 에너지의 스펙트럼 범위를 나타내는 데 사용되는 파장 간격이다. 차단 정도는 보통 optical density로 지정된다. ([그림 3-36] 참조)



[그림 3-36] 차단범위 도해

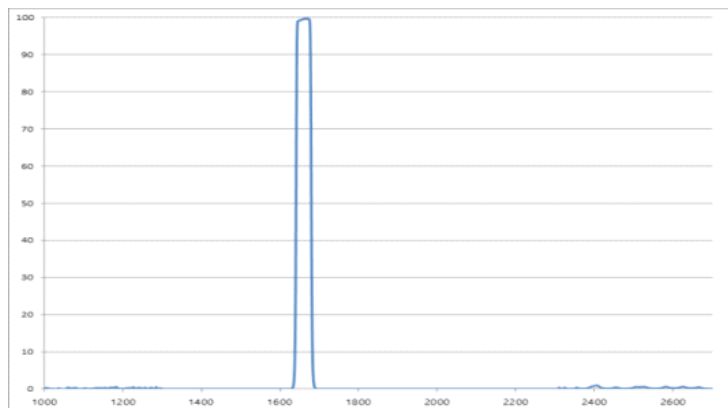
가) 투과율에 따른 필터 제작

[그림 3-37]은 1654 nm를 중심으로 한 필터의 투과율을 보여준다. 두 개의 곡선은 다른 입사 각도를 나타내며, 이 파장에서 중요한 피크를 나타낸다. [그림 3-37]은 NBPF²¹⁾ 1654 투과율 70% 설계에 따른 측정데이터이다.



[그림 3-37] NBPF 1654 설계에 따른 투과율 70% 측정데이터

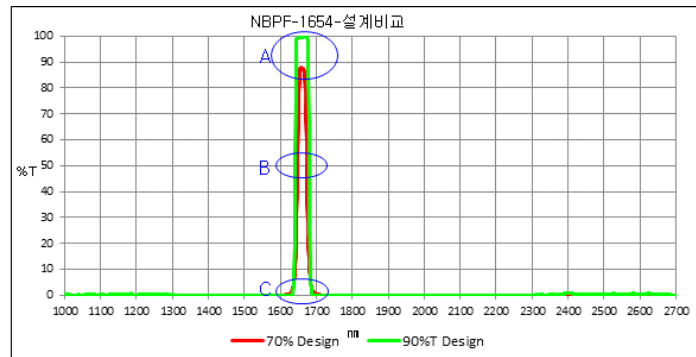
[그림 3-38]은 약 1654에서 날카로운 피크를 보여주며, 이는 강한 방출 또는 흡수 특성을 나타낸다. 주변 값은 낮아 배경 간섭이 거의 없음을 나타낸다. 투과율 90% 설계에 따른 측정데이터이다.



[그림 3-38] NBPF 1654 설계에 따른 투과율 90% 측정데이터

21) NBPF: Narrow Band Pass Filter

[그림 3-39]는 투과율에 따른 70%와 90% 설계에 따른 비교이다.



[그림 3-39] NBPF 1654 설계비교

A. NBPF-1654-70%(적색선-3Cavity design)보다 NBPF-1653-90%(녹색선-6Cavity design)의 투과율을 높여 투과성능을 향상하였다. 즉, 투과율 향상 → 센서표면의 조도값 증가→센싱효율 향상

B. NBPF-1654-70%(적색선-3Cavity design)보다 NBPF-1653-90%(녹색선-6Cavity design)의 T50% 파장 폭을 유지하면서 센싱 정밀도 유지하였다.

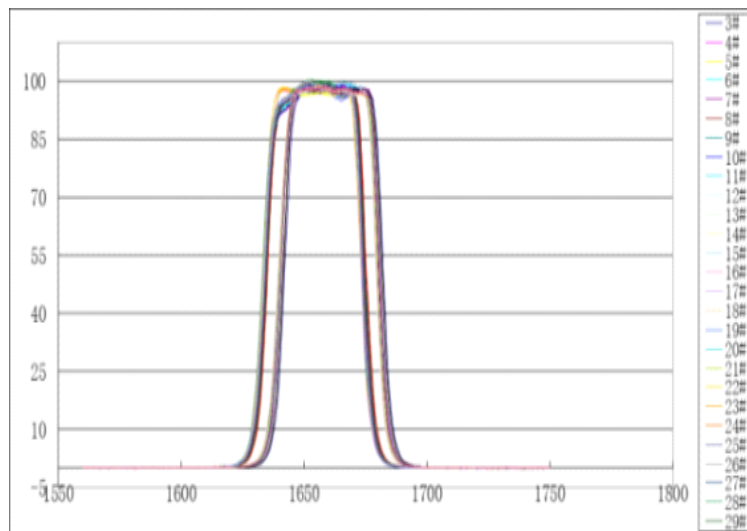
C. NBPF-1654-70%(적색선-3Cavity design)보다 NBPF-1653-90%(녹색선-6Cavity design)의 $\lambda_{90\%T} - \lambda_{1\%T}$ 차이를 감소시켜 NBPF의 성능을 차별화 하고 있다. $\lambda_{90\%T} - \lambda_{1\%T}$ 차이가 감소할수록 외부환경 변화에 의한 NBPF 성능에 대한 안정성이 높아진다.

투과영역에 대한 그래프의 모양이 직사각형에 가까울수록 NBPF 성능 안정성이 높아지지만, 이러한 multicavity 설계기법은 전체 층수와 비 정수층의 증가로 인한 설계 최적화의 어려움과 제작난이도의 증가로 이어진다.

입사각이 클수록 파장이 이동하게 된다. 광학계는 10도에서 15도 사이로 설계하며, 이에 따라 입사각은 12도에서 13도로 설정한다. 이를 바탕으로 필터를 설계하고, 코팅을 통해 1654nm 파장에서 투과율이 90% 이상인 필터를 제작한다.

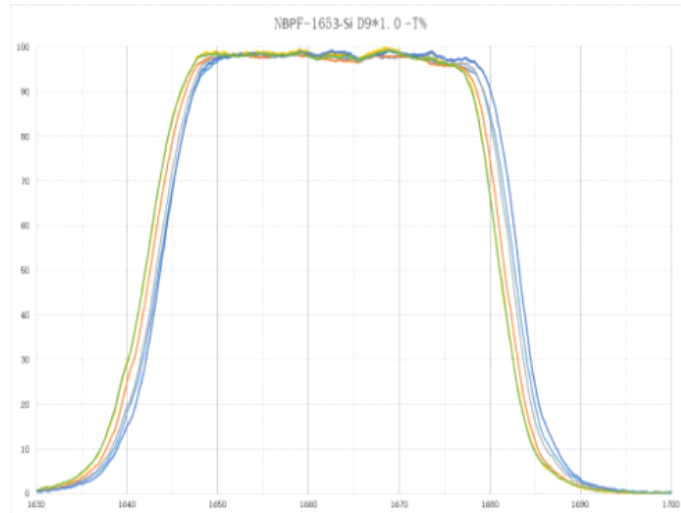
나) 직경(Diameter)에 따른 필터 제작

1654nm $\pm$ 2nm 파장을 위한 미니플랫 LD와 콜리메이터의 최적 광 위치를 확인하기 위해 직경 12mm와 9mm의 두 가지 필터를 제작한다. 성능 개선과 비교를 목적으로 두 종류를 제작하였으며, 이 중에서 직경 12mm 필터를 적용하였다. [그림 3-40]은 수직축은 0에서 100까지의 범위를 나타내고 있고, 수평축은 대략 1500에서 1800 사이의 값을 보여주며, 중심 부분에서 급격한 상승과 하강을 보인다.



[그림 3-40] 필터 측정 그래프 1654 $\pm$ 2nm Dia 12mm

[그림 3-41]은 수직축은 0에서 100까지, 수평축은 약 1450에서 1650 사이의 값을 나타내며, 중심 부분에서 평평한 구간을 가진 넓은 대역폭을 보여 준다. 이 그래프는 광학 필터의 투과 특성을 설명한다.



[그림 3-41] 필터 측정 그래프 $1654 \pm 2\text{nm}$ Dia 9mm

2) 광학필터 제작

[그림 3-42]는 광학필터를 제작한 것으로 측정 수치 97% 이상의 투과율을 나타내는 1654nm 필터이다.



[그림 3-42] 광학필터 제작

제 5 절 메탄검지 회로 및 제어시스템 설계

1) 레이저 발산 변조 최적화 회로설계

가) Tx 구동 회로 및 Rx 신호 처리 회로

(1) Tx 구동 회로

레이저 발산 변조 최적화를 위한 Tx 구동²²⁾ 회로의 주요 구성 요소와 특징은 다음과 같다. ([그림 3-43] 참조)

전원 공급 시스템은 배터리, 전원 공급 장치 또는 맞춤형 전원 회로로 구현한다. 안정적인 전원 공급이 회로의 기반이 되며, 사용 환경과 요구사항에 따라 적절한 방식을 선택한다.

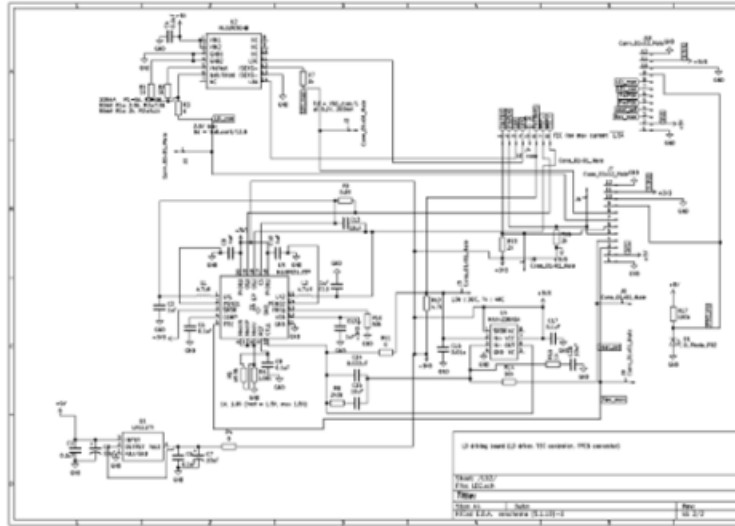
발광 소자 제어 메커니즘은 레이저 다이오드의 전압, 전류, 또는 주파수를 정밀하게 조정하여 출력을 제어한다. 이는 Tx 구동 회로의 핵심 기능으로, 레이저의 강도, 안정성, 수명에 직접적인 영향을 미친다. 펄스 레이저 시스템에서는 주파수 조정이 특히 중요하다.

사용자 인터페이스는 버튼, 스위치, 다이얼 또는 마이크로컨트롤러를 통해 사용자가 회로를 제어할 수 있게 한다. 간단한 on/off 기능부터 복잡한 프로그래밍 가능한 패턴 생성까지 다양한 제어 옵션을 제공한다. 사용 편의성과 정밀한 제어 사이의 균형이 중요하다.

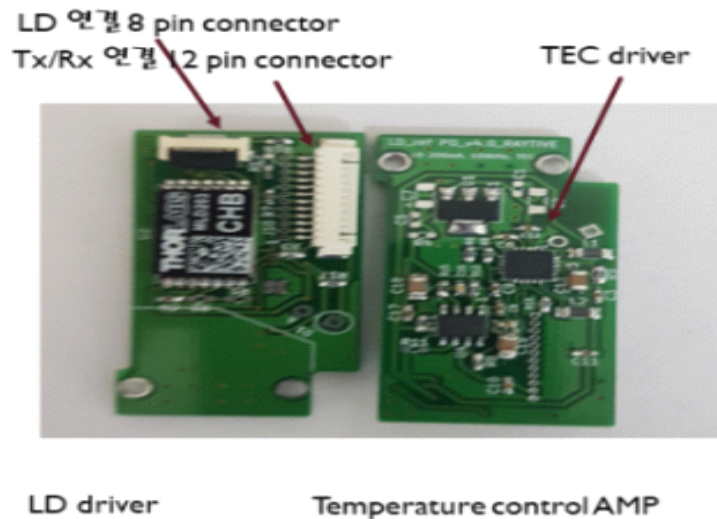
안정성 유지 메커니즘은 전압 레귤레이터, 온도 보상 회로, 피드백 시스템 등을 통해 레이저 출력의 안정성을 유지한다. 전원 변동이나 온도 변화에 따른 출력 변화를 최소화하여 측정의 정확도를 보장한다.

EMI 대책 및 열 관리는 전자기 간섭을 최소화하기 위한 PCB 설계 기법과 차폐 방법을 적용한다. 또한, 레이저 다이오드의 열을 효과적으로 관리하기 위해 히트싱크, 팬, 또는 더 복잡한 냉각 시스템을 구현한다. ([그림 3-44] 참조)

22) Tx구동회로는 터치 스크린의 송신(Transmit, Tx) 라인들에 구동신호를 공급하는 회로이다.



[그림 3-43] Tx 구동 회로



[그림 3-44] Tx 구동 회로 PCB

(2) Rx 신호 처리 회로

Rx 신호 처리 회로²³⁾의 주요 구성 요소와 기능은 다음과 같다. ([그림 3-45] 참조)

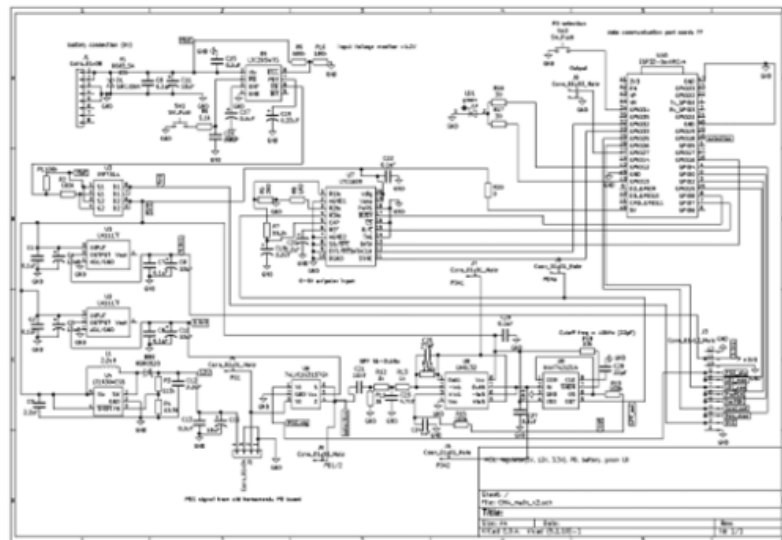
23) Rx 신호처리 회로는 수신기(Receiver)에서 입력된 신호를 처리하여 원래의 데이터를 복원하는 회로이다.

광센서 및 광파이버 시스템은 빛의 강도나 주파수를 전기 신호로 변환한다. 포토다이오드와 같은 광센서를 사용하며, 감도와 응답 속도가 중요하다. 광파이버는 반사된 빛을 효율적으로 수집하여 전달하며, 선택 시 신호 손실과 분산을 고려해야 한다.

신호 증폭 및 필터링 회로는 광센서에서 생성된 약한 신호를 증폭하고, 특정 주파수 범위로 필터링하여 품질을 향상시킨다. 저잡음 증폭기와 대역통과 필터를 사용해 신호 대 잡음비를 최대화하고 간섭을 줄인다. 자동 이득 제어 회로도 포함되어 다양한 입력 강도에 대응한다.

아날로그-디지털 변환기(ADC)는 아날로그 신호를 디지털 데이터로 변환한다. ADC의 해상도와 샘플링 속도는 시스템 성능에 영향을 미치므로, 응용 분야에 맞게 선택한다. 고속 ADC로 세밀한 변화를 포착하고 오버샘플링으로 비트 해상도를 높일 수 있다.

데이터 처리 회로는 마이크로컨트롤러나 DSP 등을 사용하여 디지털 데이터를 처리한다. 신호 디코딩, 노이즈 제거, 특징 추출 등의 작업을 수행하며, 실시간 처리가 필요한 경우 고성능 프로세서를 사용하여 정확한 결과를 얻는다.

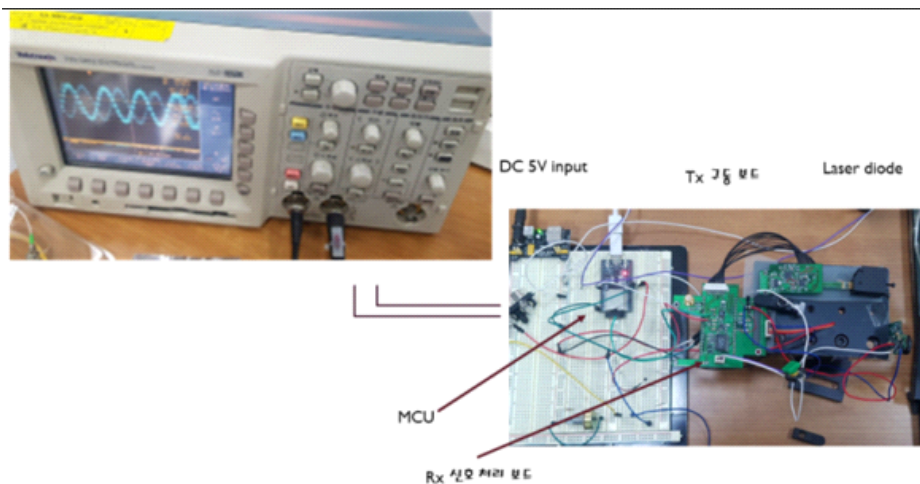


[그림 3-45] Rx 신호 처리 회로도

(3) 측정 셋업을 위한 보드 테스트 셋업 지그 제작

셋업 지그 제작 과정은 여러 단계로 이루어지며 먼저 테스트할 보드의 기능과 요구 사항을 분석하고 분석 결과를 바탕으로 셋업 지그를 설계한다. 이 단계에서는 전체 구조와 회로를 설계하고 필요한 부품을 선정한다.

제작된 셋업 지그는 보드에 연결하여 테스트하고 예상치 못한 오류가 발생하면 원인을 분석한다. 마지막으로, [그림 3-46]과 같이 테스트 결과를 바탕으로 셋업 지그를 보완한다.



[그림 3-46] 셋업 지그 테스트

나) LD 구동 연결

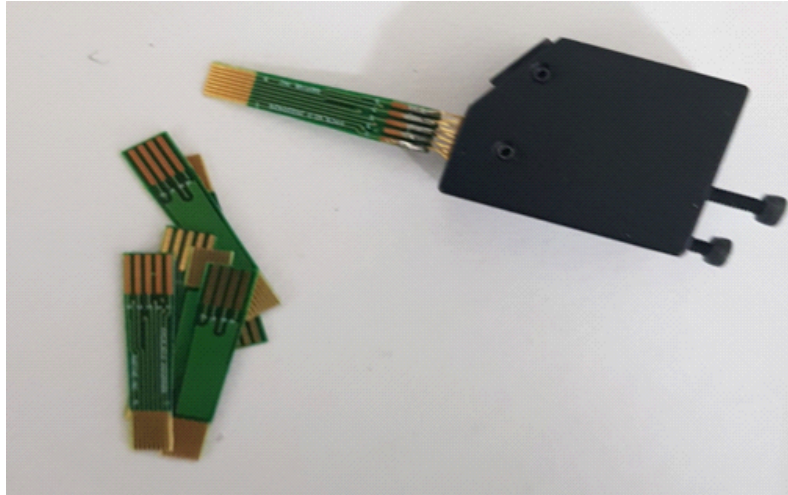
(1) LD 구동 연결 PCB

FPCB와 LD-FPCB를 연결하고, 내부에 미니플랫 LD를 삽입하여 교정 셀을 제작하는 과정은 다음과 같다. 먼저, FPCB와 LD-FPCB의 연결 모양과 방법을 설계한다. 이 단계에서는 두 PCB의 물리적 특성과 전기적 요구 사항을 고려하여 최적의 연결 방식을 결정한다.

설계된 연결 모양에 따라 FPCB와 LD-FPCB를 제작하며, 이 과정에서 유연한 PCB 재료를 사용하여 필요한 회로 및 신호 경로를 구성한다. LD-FPCB에는 미니플랫 LD를 장착할 수 있는 공간이 마련되어야 한다.

장착된 미니플랫 LD는 LD-FPCB 내에 정확히 위치해야 하며, 이를 통해 레이저 다이오드의 최적 성능을 확보할 수 있다.

마지막으로, 제작된 FPCB와 LD-FPCB를 [그림 3-47]과 같이 연결하여 전체 시스템을 완성한다. 이러한 과정을 통해 FPCB와 LD-FPCB가 효율적으로 결합되고, 미니플랫 LD가 안정적으로 장착된 교정 셀이 완성된다.

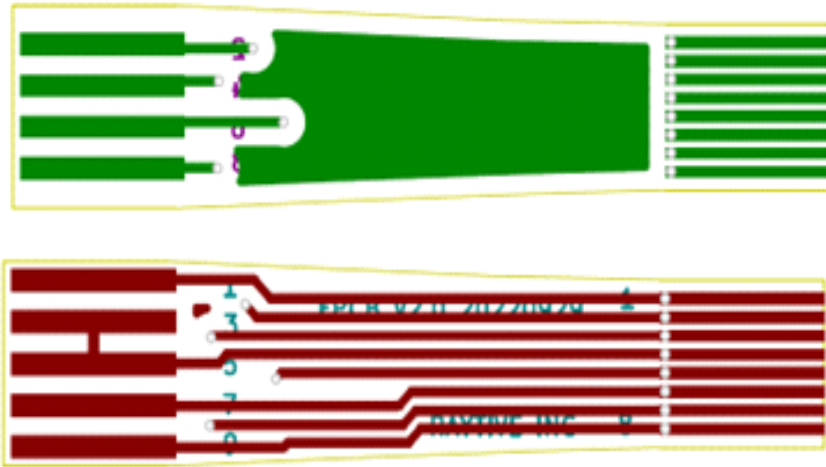


[그림 3-47] LD 구동 연결

(2) 미니플랫 LD 구동 연결 보드

미니플랫 LD를 구동하기 위한 제어 회로는 LD의 출력을 정밀하게 조절할 수 있도록 설계된다. 이 과정은 LD의 전압, 전류, 출력 등을 조절할 수 있는 회로를 구성하는 것에서 시작된다. 각 파라미터는 LD의 성능과 수명에 직접적인 영향을 미친다. ([그림 3-48] 참조)

회로 설계가 완료되면, 이를 PCB에 레이아웃하고 필요한 부품들을 배치한다. 이 단계에서는 신호 경로의 최적화와 전자기 간섭(EMI)의 최소화를 고려하여 부품을 배치한다. 또한, 열 관리와 전기적 연속성을 보장하기 위해 적절한 패턴과 레이어를 설계한다. 제작된 PCB는 철저한 테스트를 하게 되고 테스트 결과에 따라 필요한 경우 회로를 보완하고 개선한다. 이를 통해 미니플랫 LD 제어 회로는 최적의 성능을 발휘할 수 있으며, 다양한 응용 분야에서 신뢰성 있는 작동을 보장한다.



[그림 3-48] 미니플랫 LD 구동 연결 보드

(3) LD 구동보드 특성

LD 구동 보드는 미니플랫 LD의 전압과 전류를 정밀하게 조절하여, LD의 출력을 원하는 수준으로 조정하는 데 핵심적인 역할을 한다. 이를 통해 사용자는 다양한 조명 조건에 맞춰 LD의 밝기와 강도를 세밀하게 제어할 수 있다. 이러한 조정은 LD의 성능과 수명에 직접적인 영향을 미치므로, 회로 설계 시 안정성과 효율성을 고려해야 한다.

구동 보드는 또한 안정적인 전원 공급을 제공하여 LD의 안정성을 유지한다. 이는 전압 변동이나 전류 스파이크로부터 LD를 보호하는 중요한 기능을 포함한다. 전원 공급 장치는 고품질의 전력 변환기를 사용하여 일정한 전압과 전류를 유지하며, 과전압 및 과전류 보호 기능을 통해 LD의 손상을 방지한다.

외부로부터의 제어 신호를 받을 수 있는 인터페이스도 제공된다. 이 인터페이스는 외부 시스템 또는 제어 장치와 연동하여 LD를 제어할 수 있도록 설계되어 있다. 다양한 통신 프로토콜을 지원하며, 사용자 편의를 위해 직관적인 GUI나 원격 제어 기능을 포함할 수 있다. 이를 통해 사용자는 복잡한 조명 패턴이나 자동화된 시퀀스를 쉽게 구현할 수 있다.

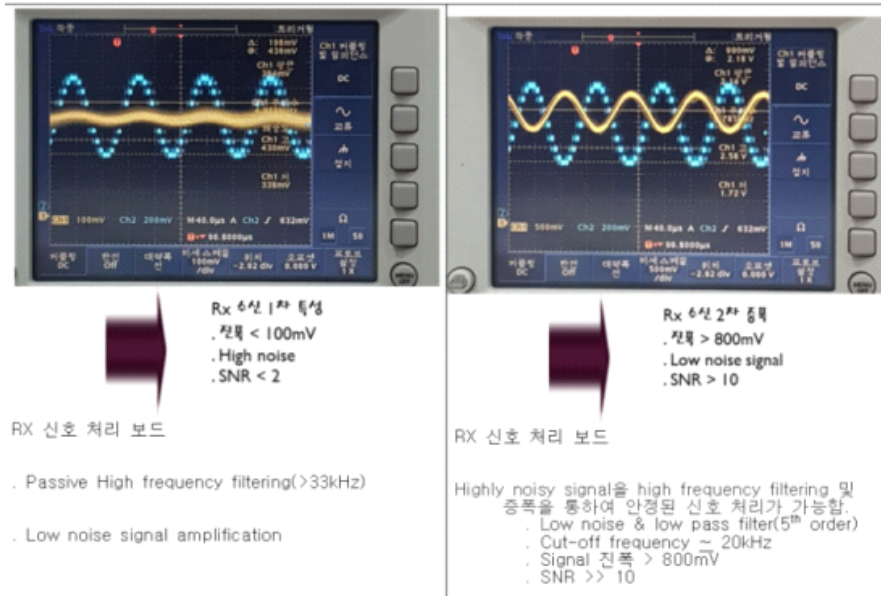
이 외에도 구동 보드는 열 관리 시스템을 갖추고 있어, LD 작동 중 발생하는 열을 효과적으로 방출한다. 히트싱크나 팬을 사용하여 열을 효율적으로 관리하며, 이는 LD의 성능 최적화와 장기적인 신뢰성에 기여한다. 이러한 요소들이 결합되어 LD 구동 보드는 다양한 응용 분야에서 높은 성능과 신뢰성을 제공하며, 사용자가 원하는 조명 효과를 정밀하게 구현할 수 있는 기반을 마련한다. ([그림 3-49] 참조)



[그림 3-49] LD 구동 보드 출력 특성

(4) Rx 수신 1차 / 2차 증폭 수신 특성

[그림 3-50]은 Rx 수신 1차 및 2차 증폭 특성을 나타낸다. 1차 증폭 단계에서는 수신 신호가 미약하고 잡음이 높은 상태로 입력된다. 이 단계에서의 신호 대 잡음비(SNR)는 2 미만으로 유지된다. 신호의 품질 향상을 위해 33Hz의 수동 고주파 필터링이 적용된다. 2차 증폭 단계에서는 신호의 강도가 증가하고 잡음이 감소하여 SNR이 10 이상으로 개선된다. 이 과정에서 고잡음 신호에 대한 추가적인 고주파 필터링이 수행되며, 동시에 저잡음 신호의 증폭이 이루어진다. 이러한 두 단계의 증폭 과정을 통해 초기의 약한 신호를 효과적으로 증폭하고 잡음을 제거하여 최종적으로 높은 품질의 수신 신호를 얻는다.



[그림 3-50] Rx 수신 1차 / 2차 증폭 수신 특성

(5) Rx 수신 최종 signal 특성

레이저 다이오드(LD)의 안정적인 구동 특성은 정밀한 온도 제어를 통해 확보된다. 본 연구에서는 LD의 온도를 40℃로 유지하여 최적의 작동 조건을 구현하였다. 구동 전류는 50mA를 중심으로 $\pm 20\text{mA}$ 범위 내에서 변동하며, 이는 LD의 출력 안정성을 보장하는 데 중요한 역할을 한다.

LD의 변조 주파수는 10kHz로 설정되었으며, 이는 다양한 응용 분야에서 요구되는 고속 스위칭 능력을 충족시킨다. 평균 광출력은 8.65mW로 측정되었으며, 이는 많은 광학 시스템에서 요구되는 적정 수준의 출력이다.

특히 주목할 만한 점은 LD의 광출력 안정성이다. 3시간 동안의 연속 작동 중 광출력 변동이 0.1% 미만으로 유지되었다. 이러한 높은 수준의 안정성은 정밀한 온도 제어와 최적화된 구동 조건의 결과로, 장시간 안정적인 성능이 요구되는 고급 광학 시스템에 적합한 특성이다.

이러한 구동 특성은 LD가 다양한 응용 분야, 특히 정밀 계측, 광통신, 분광학 등에서 신뢰성 높은 광원으로 활용될 수 있음을 시사한다. 이를 표로 정리하면 [표 3-5]와 같다.

[표 3-5] Rx 수신 최종 signal 특성

항목	특징
Temperature control	40°C
구동 전류	50mA ± 20mA
Frequency Average	10kHz
Power	8.65mW
Optical Power Variation	0.1% during 3hrs

2) 광학계 설계 및 패키징 모듈 제작

가) MCU 구성요소

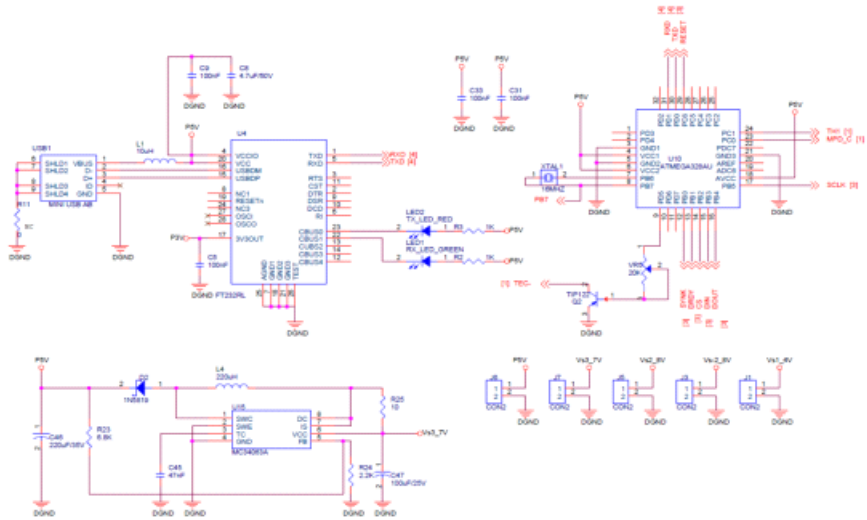
MCU(Microcontroller Unit)는 중앙 처리 장치로서 다양한 입력 신호를 처리하고 출력 신호를 제어하는 역할을 수행한다. 이 회로도에는 MCU의 안정적인 동작을 위한 여러 구성 요소가 포함된다.

전원 공급부에는 MCU에 안정적인 전원을 공급하기 위한 전압 조절기와 필터가 배치된다. 이를 통해 MCU가 요구하는 정확한 전압 수준을 유지하고 전원 노이즈를 최소화한다.

입출력 인터페이스 부분에는 다양한 센서 및 액추에이터와의 연결을 위한 GPIO(General Purpose Input/Output) 핀이 배치된다. 또한 외부 장치와의 통신을 위한 UART, SPI, I2C 등의 통신 포트가 구성된다.

디버깅 및 프로그래밍을 위해 JTAG(Joint Test Action Group) 또는 SWD(Serial Wire Debug) 인터페이스가 포함될 수 있다. 이를 통해 MCU의 펌웨어 업데이트와 실시간 디버깅이 가능하다.

이러한 구성 요소들이 적절히 배치되고 연결되어 [그림 3-51]과 같이 MCU가 효율적으로 동작할 수 있는 환경을 제공한다.



[그림 3-51] MCU 연결 회로도

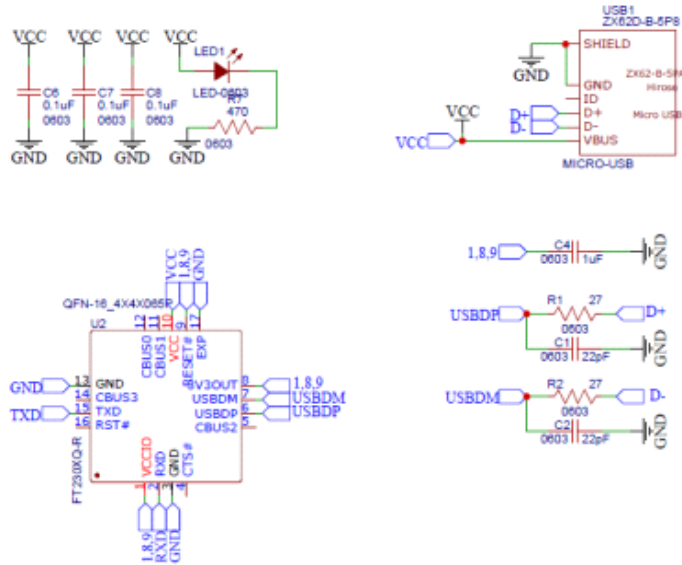
나) RF 통신 구성요소

RF 모듈은 무선 통신을 통해 데이터를 송수신하는 역할을 수행한다.

[그림 3-52]와 같이 이 모듈에는 안테나와 매칭 네트워크가 포함되어 효율적인 신호 전송 및 수신을 가능하게 한다. 데이터 변환기 부분에는 아날로그 신호를 디지털로 변환하는 ADC(Analog-to-Digital Converter)와 디지털 신호를 아날로그로 변환하는 DAC(Digital-to-Analog Converter)가 배치된다. 이를 통해 아날로그 세계와 디지털 처리 사이의 인터페이스를 제공한다.

증폭기 및 필터 회로는 신호의 강도를 적절히 조절하고 불필요한 주파수 성분을 제거하여 신호 품질을 향상시킨다. 이 과정을 통해 통신의 신뢰성과 정확성을 높인다.

전원 관리 부분에는 시스템의 각 구성 요소에 적절한 전압과 전류를 공급하기 위한 회로가 포함된다. 이 회로는 전압 레귤레이터, 전류 제한 장치, 전원 스위칭 회로 등으로 구성되어 시스템의 안정적인 동작을 보장한다. 이러한 구성 요소들이 유기적으로 연결되어 RF 통신 시스템의 효율적인 동작을 가능하게 한다.

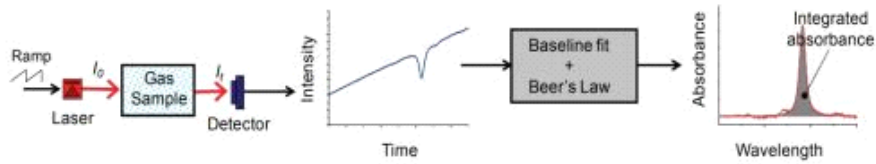


[그림 3-52] 메탄검지 측정 송수신시스템 회로부

다) 가스 농도가 광 파장 흡수에 미치는 영향 측정

브로드밴드 소스와 OSA를 통해 가스 농도가 광 파장 흡수에 미치는 영향을 측정하고 새로운 광학 측정 구조를 적용한다. [그림 3-53]은 스캔 파장 직접 흡수 분광법에 관한 것이다. 스캔 파장 직접 흡수 분광법은 가변 다이오드 레이저를 사용하여 가스 샘플의 특성을 분석하는 기술이다.

이 방법에서는 레이저가 특정 파장의 빛을 생성하여 가스 샘플을 조사한다. 빛이 가스 샘플을 통과하는 동안 특정 분자들이 특정 파장의 빛을 흡수하게 되며, 이로 인해 빛의 강도가 감소한다. 감지기는 이러한 강도 변화를 측정하여 가스 샘플의 흡수 특성을 파악한다. 측정된 데이터는 컴퓨터 처리를 통해 신호 잡음이나 배경 흡수를 조정하는 기초선 맞춤 과정을 거친다. 이후 비어의 법칙을 적용하여 측정된 흡광도를 가스 내 흡수 물질의 농도와 연관지어 해석한다. 마지막으로, 통합 흡광도를 계산하여 특정 파장 범위에 걸친 전체적인 흡수 특성을 나타낸다.

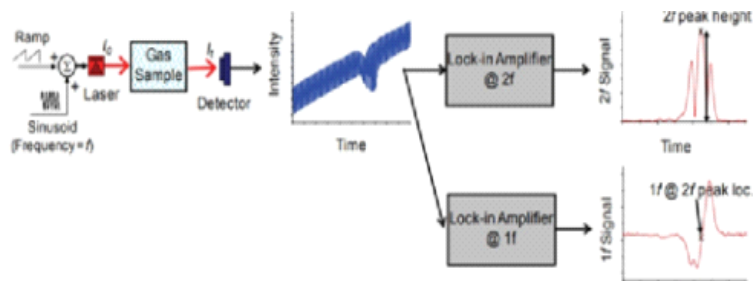


Schematic of scanned-wavelength direct-absorption spectroscopy with a tunable diode laser. Example data is water-vapor absorption measured in a scramjet combustor at the Air Force Research Laboratory

[그림 3-53] 가스 센싱을 위한 기본 개요

[그림 3-54]는 파장 변조 분광법(WMS)에 관한 것으로 파장 변조 분광법(WMS)은 주로 가스 샘플의 농도를 측정하는 데 사용되는 기술이다. 이 방법에서는 레이저가 램프 신호와 정현파 신호를 결합하여 주파수 변조를 수행하며 가스 샘플을 조사한다. 레이저의 파장이 변조되어 가스 샘플을 통과한 후, 검출기가 시간에 따른 신호를 수집한다. 수집된 신호는 두 개의 락인 증폭기를 통해 분석된다. 첫 번째 락인 증폭기는 $2f$ 성분을 추출하고, 두 번째 락인 증폭기는 $1f$ 성분을 추출한다. $2f$ 신호는 주로 가스의 농도와 관련된 정보를 제공하며, $1f$ 신호는 잡음을 줄이고 신호를 정규화하는 데 사용된다.

최종적으로, $1f$ 로 정규화된 $2f$ 신호(WMS- $2f$)를 통해 가스 샘플의 농도를 보다 정확하게 측정할 수 있다. 이 과정을 통해 얻어진 시간에 따른 $2f$ 신호와 $1f$ 로 정규화된 신호의 피크 위치는 그래프로 표현되어 가스 농도의 변화를 시각적으로 확인할 수 있게 한다.



Schematic of wavelength-modulation spectroscopy (1f-normalized, WMS-2f).

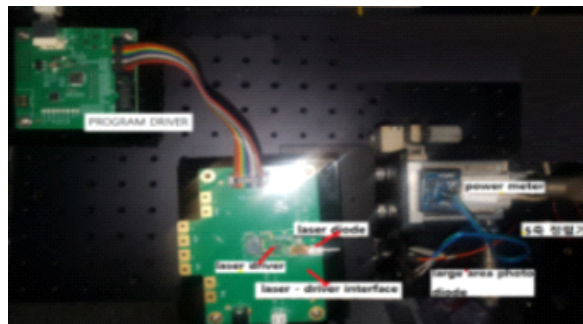
[그림 3-54] 광학적 $2f$ 발생을 위한 개념도

[그림 3-55]는 레이저 시스템의 실험 설정을 보여준다. 레이저 드라이버와 다이오드가 연결되어 있으며, 커넥터를 통해 파워 미터와 광검출기가 설치되어 있다. OSA(Optical Spectrum Analyzer)가 시스템에 연결되어 있어 스펙트럼 분석을 한다. 최대 파워가 나온 값에서 전원에 가변적으로 파워를 조절하여 LD 구동 전압, LD 구동 전류, m-PD 파워값, m-PD 전류값, LD 출력값을 보면서 5축 구동기를 작동한다.



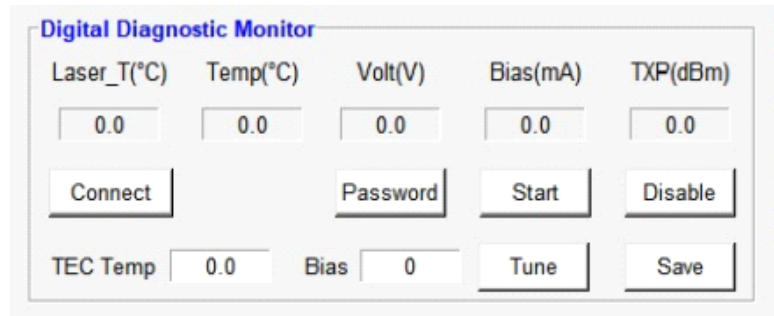
[그림 3-55] 레이저 드라이버와 5축
정렬 장비 파장 측정 셋업

[그림 3-56]은 레이저 다이오드 시스템의 구성 요소를 나타낸다. 프로그램 드라이버가 레이저 드라이버와 인터페이스 되어 있으며, 레이저 다이오드가 설치되어 있다. 또한, 광 검출기와 파워 미터가 연결되어 있어 출력 신호를 측정한다.



[그림 3-56] 레이저 파워 측정 및
프로그램 로딩용 셋업

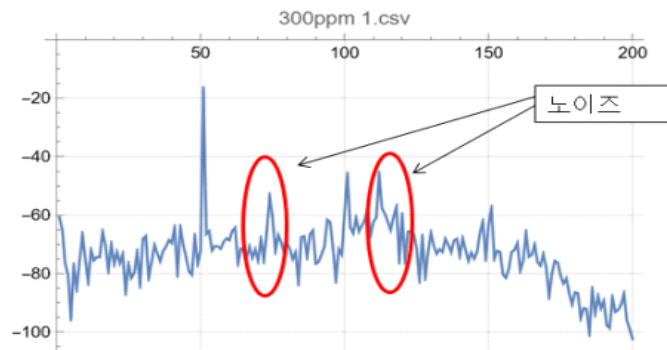
[그림 3-57]은 디지털 진단 모니터의 인터페이스를 보여준다. 이 모니터는 레이저 온도, 전압, 바이어스 전류, 출력 전력 등을 실시간으로 모니터링하고 제어한다.



[그림 3-57] 프로그램 전압, 온도 셋업

3) 노이즈 제거 및 검지 신호처리

[그림 3-58]은 신호처리에서 노이즈 제거 및 검출을 위한 스펙트럼 분석을 나타낸다. 노이즈는 신호 캡처, 저장, 전송, 처리 중에 발생할 수 있는 원치 않는 변형을 의미하며, 이는 신호의 품질을 저하시킬 수 있다. 그래프에서 빨간색으로 표시된 부분은 노이즈가 발생한 구간을 나타내며, 이러한 노이즈는 전자기 간섭, 불량한 배선, 접지 문제 등 다양한 원인으로 인해 발생할 수 있다. 노이즈를 효과적으로 제거하기 위해서는 필터링 기법이나 주파수 분석을 통해 신호와 노이즈를 분리하는 것이 중요하다.



[그림 3-58] 노이즈 소스 원인 분석

가) 노이즈 제거를 위해 BOM 일부 변경

[그림 3-59]와 같이 본 연구에서 설계된 회로는 다양한 전자 부품으로 구성되며, 각 부품은 특정 기능을 수행하기 위해 신중히 선택된다. 회로 내 커패시터들은 C99, C100, C114, C118 등의 참조 번호로 식별되며, 이 중 11개의 커패시터가 $1\mu\text{F}$ 의 용량을 가진다. 이러한 커패시터 배열은 회로의 안정성과 노이즈 제거에 중요한 역할을 한다. 인덕터의 경우, L5는 $242\mu\text{H}$, L303은 $2.2\mu\text{H}$ 의 용량을 가지며, 이들은 각각 회로 내 특정 주파수 대역의 신호를 필터링하거나 임피던스 매칭을 위해 사용된다. 저항 부품 중 R87과 R89는 동일한 $1.5\text{k}\Omega$ 의 저항값을 가지며, 이는 전압 분배나 전류 제한 등의 목적으로 회로에 통합된다. 이러한 부품들의 정확한 선정과 배치는 회로의 전체적인 성능과 신뢰성을 결정짓는 핵심 요소가 된다.

Quantity	Reference	Part	package	업체명	제조업체부품번호
11(10)	C99,C100,C114,C118,(C123), C126,C302,C303,C313,C315,C351	1uF			
1(0)	(C110)	100nF			
1	D301	ss34b		ON SEMICONDUCTOR	MBR0520
1	L5	242uH		MURATA	LQH43NN242J03L
1	L303	2.2uH		MURATA	LQH3C2R2M24
2(1)	R87,(R89)	1.5KF			
3(2)	TC51,TC302,(TC310)	4.7uF/V			
3(2)	TC305,TC306,(TC312)	2.2uF/V			
1	U306	LT1930		Analog Devices Inc. (LINEAR TECHNOLOGY)	LT1930A
2	C310,C312 TC310,TC312 삭제)	(2.2uF,25V	[2012]	MURATA	GRM219B31E225KA75#
1	C123	1000pF,50V,1%,COG,NP0	[1005]	MURATA	GRM1555C1H102FA01J
1	C110	0.1uF,10V,5%,	[2012]	MURATA	GRM21B7U1A104JA01L
1	R89	24k,1%,1/10W	[1608]	Stackpole	RMCF0603FT24K0
1	C110	0.1uF,50V,2%,T OC	[3216]	MURATA	GRM3195C1H104GA05#

[그림 3-59] 변경한 BOM 일부

나) 외란광의 간섭영향 개선

외란광 간섭, 특히 형광등이나 아크릴 등에서 발생하는 반사파로 인한 문제는 광학 시스템의 성능을 저하하는 주요 요인이다. [그림 3-60]과 같이 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 최신 FPGA 기술의 내부 PLL을 활용한 혁신적인 접근 방식을 제안한다. FPGA의 내부 PLL은 고정밀 주파수 합성 및 저스큐 클록 소스 생성 능력을 통해 시스템의 전반적인 성능을 향상시킨다. 이를 통해 구현된 저지터 설계는 신호의 시간적 안정성을 극대화하여 외란광에 의한 간섭 효과를 효과적으로 상쇄한다.

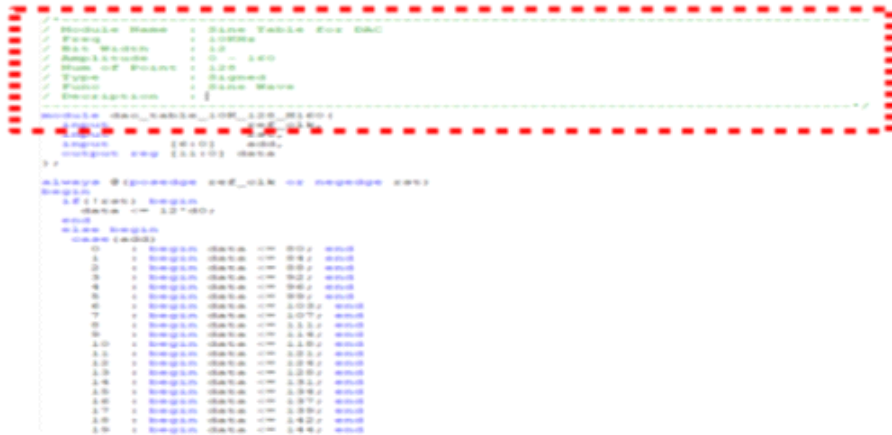
<pre>//Output Output Phase Duty Pk-to-Pk Phase //Clock Freq (MHz) (degrees) Cycle (%) Jitter (ps) Error (ps) // CLK_OUT1 25.812 0.000 50.0 545.001 394.904 // // *Input Clock Freq (MHz) Input Jitter (UI)* //----- // _primary 30.000 0.010 timescale 1ps/1ps (* CORE_GENERATION_INFO = "SAMPLX_GEN,clk_wiz_v3_6,(component_name=SAMPLX_GEN,us" module SAMPLX_GEN // Clock in ports input clkini, // Clock out ports output CLK_OUT1 };</pre>	<pre>//Output Output Phase Duty Pk-to-Pk Phase //Clock Freq (MHz) (degrees) Cycle (%) Jitter (ps) Error (ps) // CLK_OUT1 24.000 0.000 50.0 202.151 154.678 // // *Input Clock Freq (MHz) Input Jitter (UI)* //----- // _primary 30.000 0.01 timescale 1ps/1ps (* CORE_GENERATION_INFO = "CAMLCLX_GEN,clk_wiz_v3_6,(component_name=CAMLCLX_GEN,us" module CAMLCLX_GEN // Clock in ports</pre>
---	---

[그림 3-60] Low-Jitter Design

다) 안정적인 Sine Wave 출력

[그림 3-61]과 같이 안정적인 사인파 출력을 위해 기존의 사인파보다 두 배 많은 128 포인트를 샘플링하여 더욱 깨끗한 사인파를 DAC를 통해 출력할 수 있도록 설계되었다. 이 접근 방식은 샘플링 포인트 수를 늘려 신호의 해상도를 높이며, 결과적으로 출력되는 사인파의 품질을 향상시킨다. DAC는 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하는 장치로, 샘플링된 데이터 포인트를 기반으로 연속적인 사인파를 생성한다. 이러한 설계는 특히 고주파 응용 분야에서 중요한데, 이는 더 높은 주파수에서 신호 왜곡을 줄이고 정확한 파형을 제공하기 때문이다.

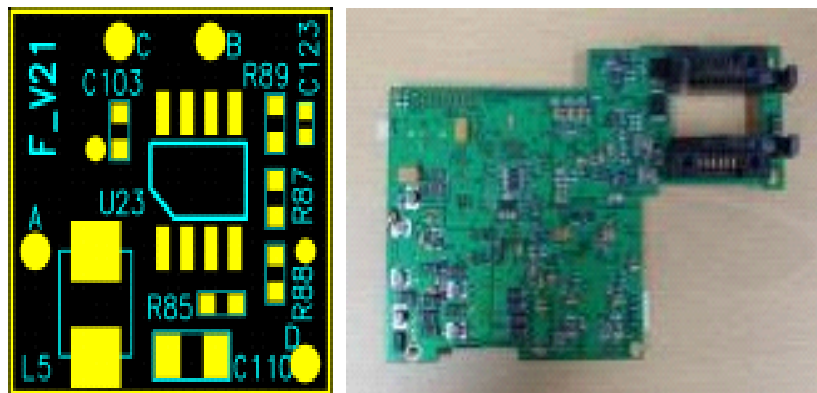
또한, 샘플링 포인트가 많아질수록 출력되는 신호의 스펙트럼 성능이 개선되어, 더 낮은 왜곡과 더 높은 신호 대 잡음비(SNR)를 달성할 수 있다.



[그림 3-61] 안정적인 Sine Wave 출력

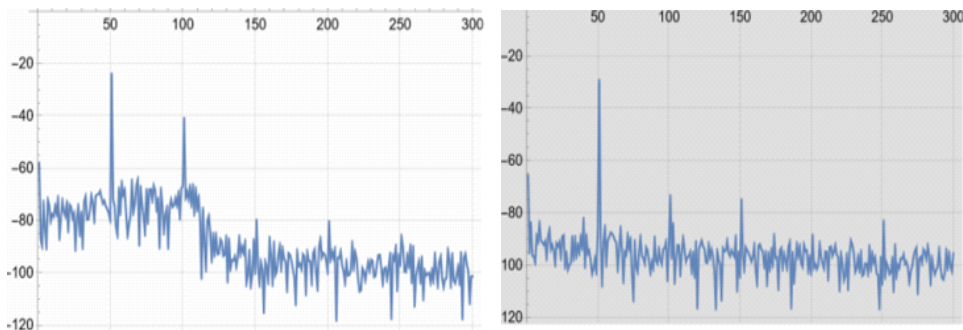
라) LD(Laser Diode) 보드의 거버 파일과 테스트용 PCB 제작

[그림 3-62] 왼쪽 이미지는 PCB 설계 소프트웨어에서 출력된 거버 파일의 일부로서 이 파일은 PCB의 레이아웃을 보여주며, 각 구성 요소의 위치와 연결을 명확히 나타낸다. 거버 파일은 PCB 제조에 필수적인 데이터로, 회로 기판의 층별 정보와 부품 배치를 포함한다. 오른쪽 이미지는 실제로 제작된 테스트용 PCB로서 설계를 반영하여 제조되어, LD(Laser Diode) 시스템의 성능을 검증하는 데 사용된다.



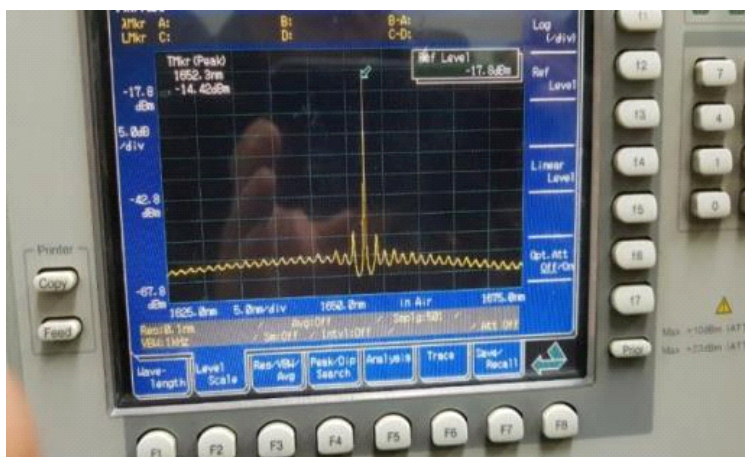
[그림 3-62] LD보드의 거버 파일(左)와 테스트용 PCB(右)

[그림 3-63] 왼쪽 그래프에서는 150PPM 이하의 노이즈가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이는 다양한 주파수 대역에서 노이즈가 발생하고 있음을 보여준다. 오른쪽 그래프는 필터를 적용한 후의 상태로, 150PPM 이하의 노이즈가 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. 필터는 특정 주파수 대역의 노이즈를 효과적으로 제거하여 신호의 순도를 높이고, 시스템의 성능을 개선하는 데 기여한다.



[그림 3-63] 필터 사용전(左)와 사용 후(右)

[그림 3-64]는 스펙트럼 분석기를 사용하여 LD와 PD의 파형을 테스트한 것이다.



[그림 3-64] LD, PD 파형 테스트

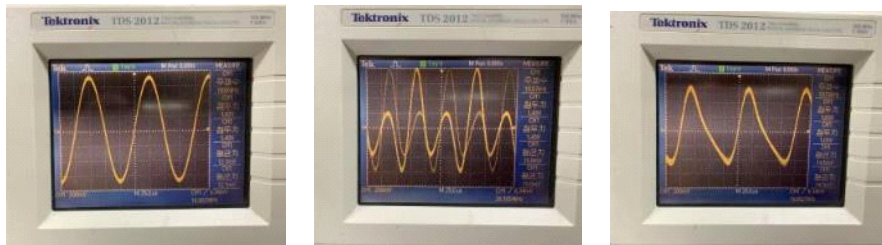
[그림 3-65]는 가스 센서를 통해 측정된 파형을 보여주고 있다. 각각의 파형은 가스 농도에 따른 변화를 나타낸다.

먼저, (a) 그림에서는 가스가 없을 때의 파형을 보여준다. 이 상태에서는 파형이 비교적 일정하고 규칙적인 형태를 유지한다. 이는 센서가 안정적인 환경에서 작동하고 있음을 의미한다.

다음으로, (b) 그림에서는 저농도의 가스가 검출되었을 때의 파형을 나타낸다. 이 경우, 파형의 진폭이나 주파수에 변화가 생기며, 이는 센서가 가스의 존재를 감지했음을 보여준다. 이러한 변화는 가스 농도가 낮기 때문에 상대적으로 미미할 수 있다.

마지막으로, (c) 그림에서는 고농도의 가스가 검출되었을 때의 파형을 제시한다. 이 상태에서는 파형의 변화가 더욱 두드러지게 나타난다. 진폭이나 주파수의 변화가 더 크며, 이는 센서가 높은 농도의 가스를 감지했음을 의미한다. 이러한 변화는 센서가 환경 내 가스 농도의 증가에 민감하게 반응하고 있음을 보여준다.

이와 같이, 각 파형은 가스의 존재 여부와 농도에 따라 다르게 나타나며, 이를 통해 센서는 환경 내 가스를 효과적으로 감지한다.

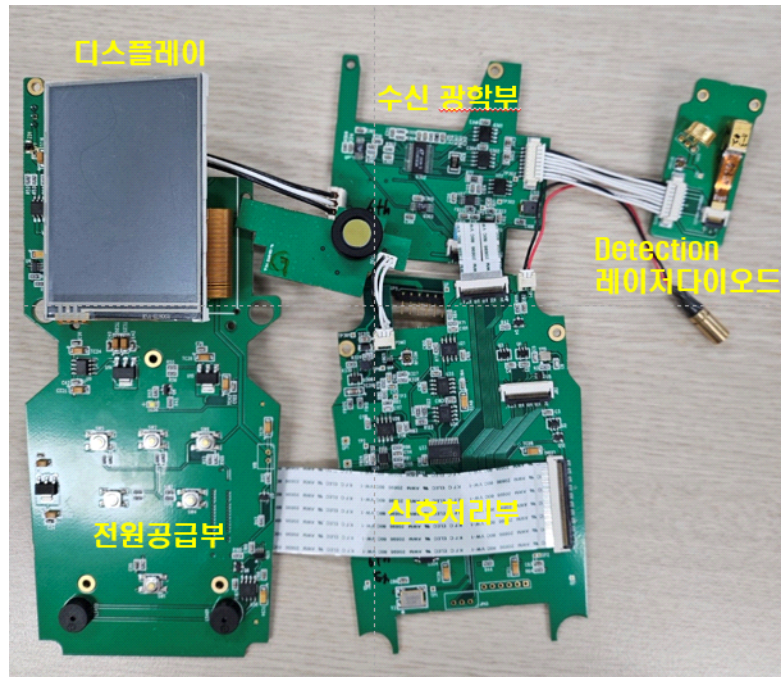


(a)가스 없을시 파형 b)저농도 검출시 파형 (c)고농도 검출시 파형

[그림 3-65] 가스농도에 따른 파형의 변화

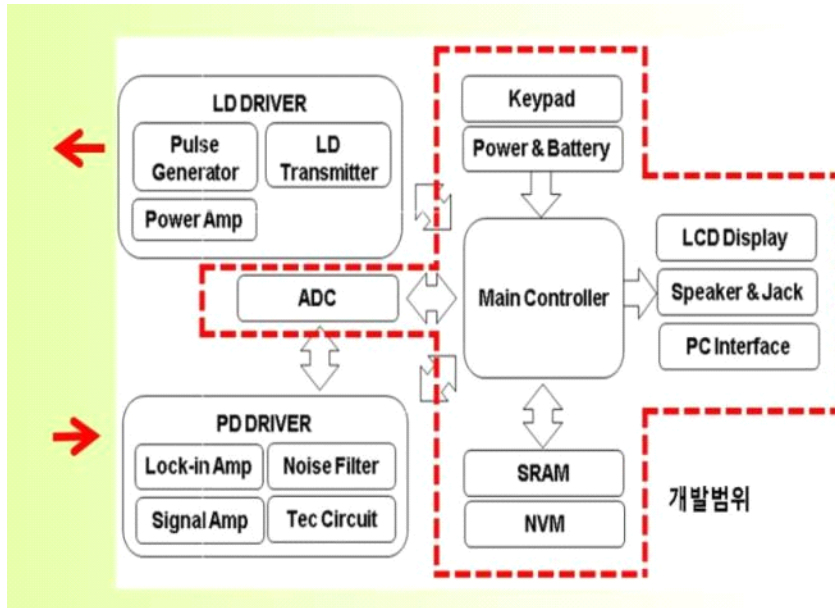
제 6 절 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 구성

[그림 3-66]은 1654nm의 Laser Diode를 탑재하고 PCB를 장착하여 Detection 레이저를 조사(照射)한 후 반사되어 돌아오는 검지 신호를 수신용 광학계를 통하여 받은 후 신호처리를 하여 디스플레이에 검지된 농도를 표시하도록 하는 장치의 구성을 나타낸다.



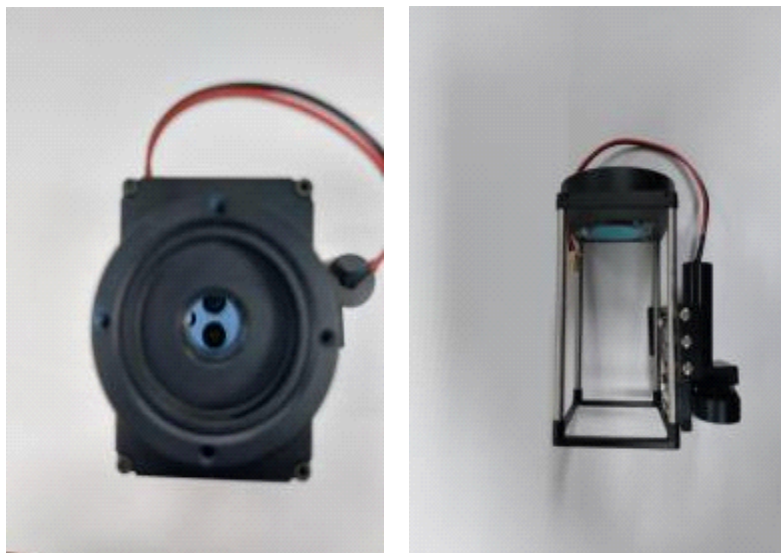
[그림 3-66] 레이저 메탄누출 검지기의 구성

[그림 3-66]의 장치를 블록 다이어그램으로 나타내면 [그림 3-67]과 같다. LD Drive에 전류를 공급하여 파장을 발생하여 송신하여 반사되어 돌아오는 신호를 PD Drive에서 Lock-in Amp를 구성하고 필터로 Noise를 차단하고 메인 회로에서 제어 및 디스플레이 하여 측정값을 나타낸다.



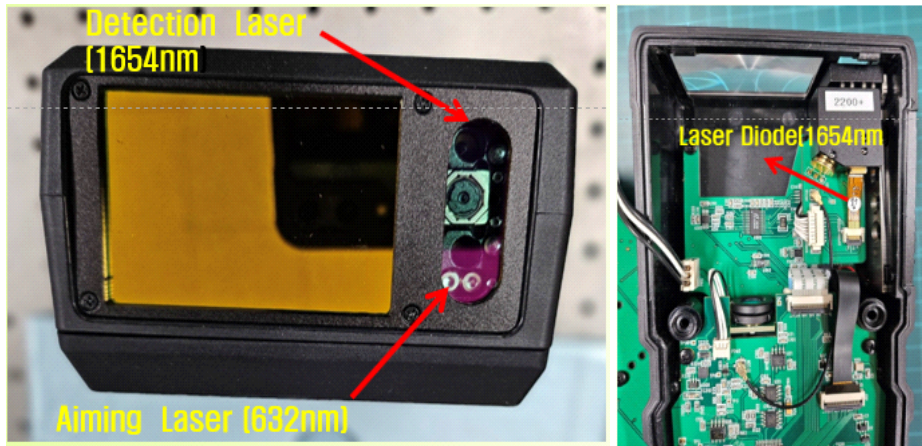
[그림 3-67] 레이저 메탄누출 검지기 블록 다이어그램

개발한 1654nm 프레즈넬 광학렌즈는 [그림 3-68]과 같다.



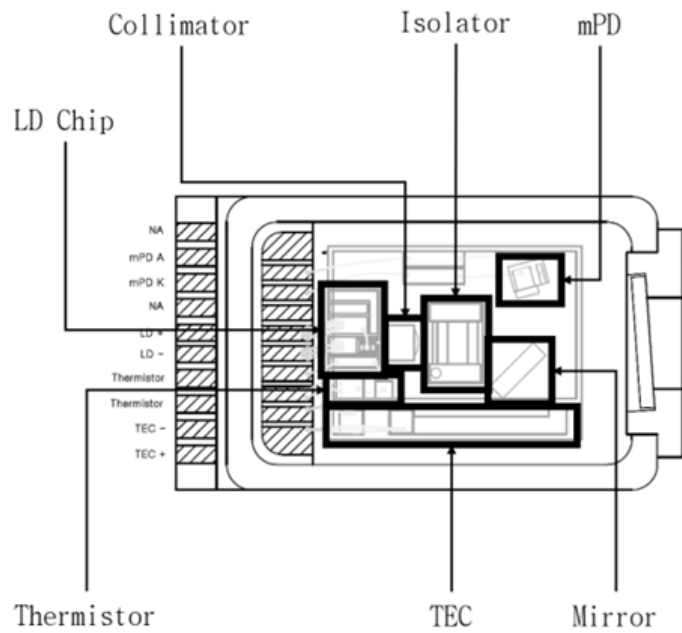
[그림 3-68] 수광부 광학렌즈

검지부 레이저 다이오드는 [그림 3-69]와 같다. 사진 왼쪽은 Laser Diode 1654nm 검지 레이저와 눈에 보이지 않는 검지레이저가 조사(照射)하고 있는 위치를 알도록 하기 위해 그린레이저를 같이 사용하고 있다. 오른쪽은 레이저 다이오드를 내장하고 있는 모습이다.

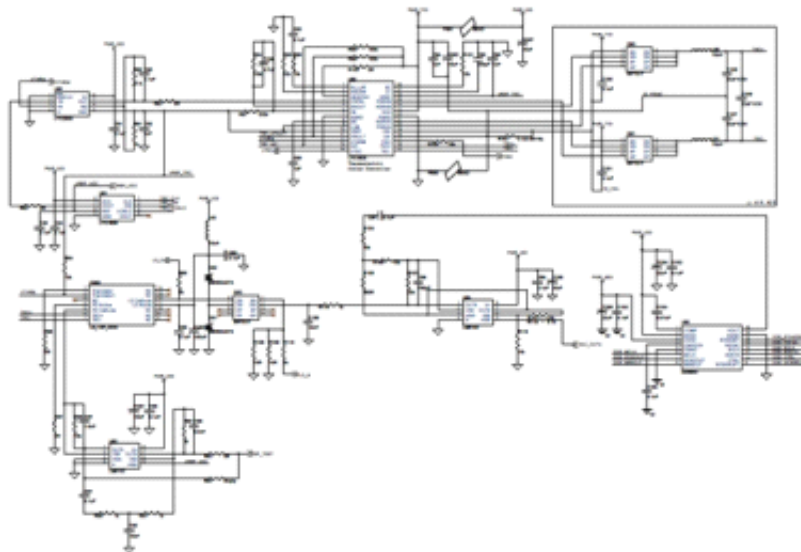


[그림 3-69] 레이저 다이오드 탑재형상

[그림 3-70]에 제시된 LD (Laser Diode)는 Mini Flat type으로 개발한 것을 그림으로 나타내었으며 PD (Photo Diode)를 사용하여 회로를 구성하였고, 적외선 레이저 신호처리 제어 보드를 제작하였다. LD 드라이버 보드(LD Driver Board)는 레이저 발신신호를 제어하고 PD 드라이버 보드(PD Driver Board)는 레이저 수신신호를 증폭 제어한다. LD 발신부는 Thermister Check, Tec Check, Sine Wave 출력 동작을 기본으로 하고 LD 제어 회로(컨트롤 회로)는 [그림 3-71]와 같다.

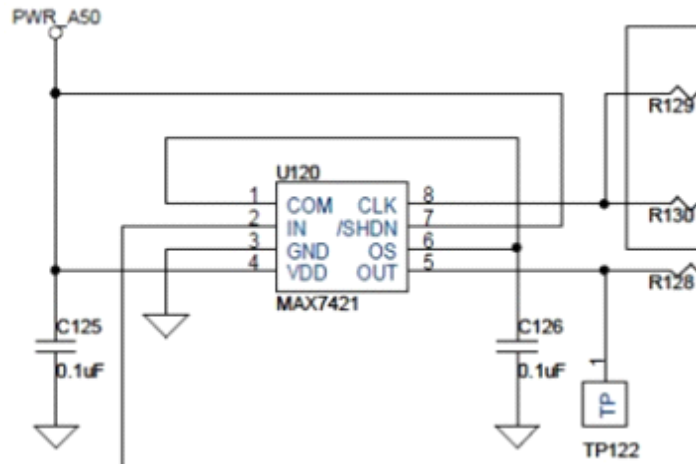


[그림 3-70] Mini Flat type Laser Diode

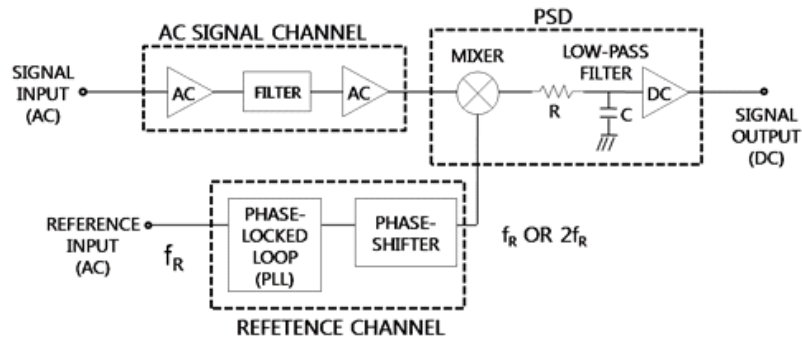


[그림 3-71] 레이저 다이오드 제어회로

발광(LD) 및 수신(PD) 모듈을 개선하기 위하여 필터를 통해 노이즈를 걸러내고 광학 필터링을 한다. 걸러진 저농도 신호를 Log 회로를 거쳐 증폭한다. 즉, PD센서 모듈에서 입력되는 신호를 [그림 3-72]와 같은 구조의 10K RC Low Pass Filter를 거쳐 LM6132에서 40배 증폭하여 ADC로 신호를 보내준다. 잡음 제거를 위하여 [그림 3-73]의 Lock-in Amplifier를 개발한다. 통신, 전원, 전자파 등 미세 노이즈 간섭 효과를 최소화하고 저(低)농도를 검지할 수 있는 신호를 최적화한다. 잡음 제거 신호처리 기술의 최적화를 통하여 저농도 검지 측정을 구현한다.



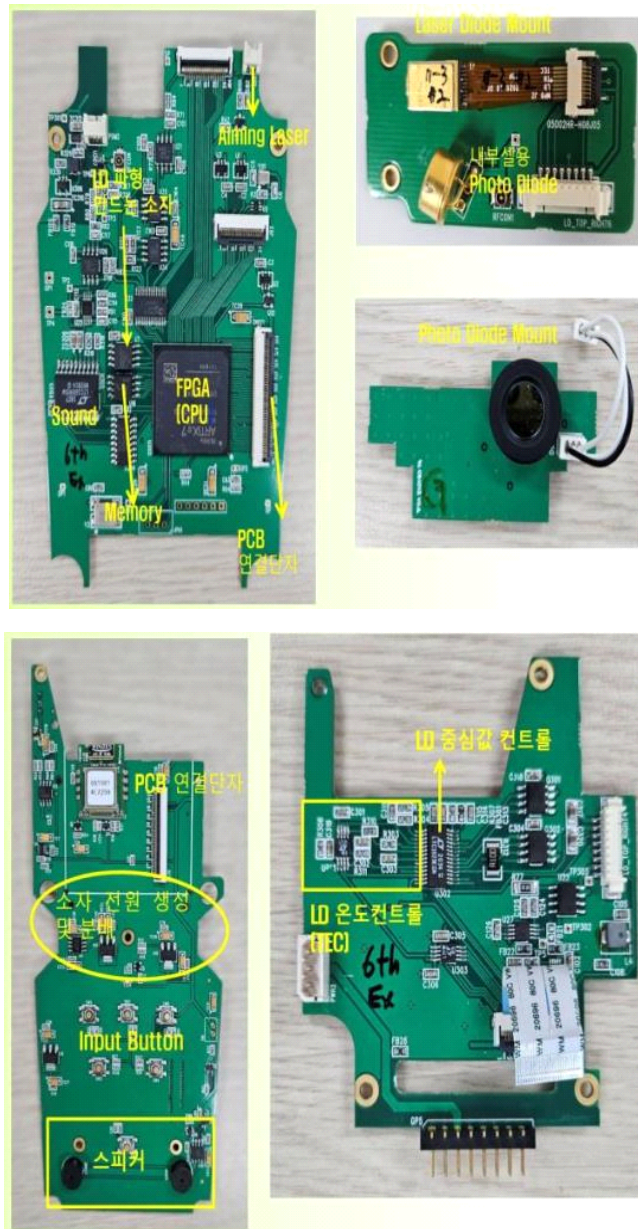
[그림 3-72] 필터 회로부



[그림 3-73] Lock-In Amplifier

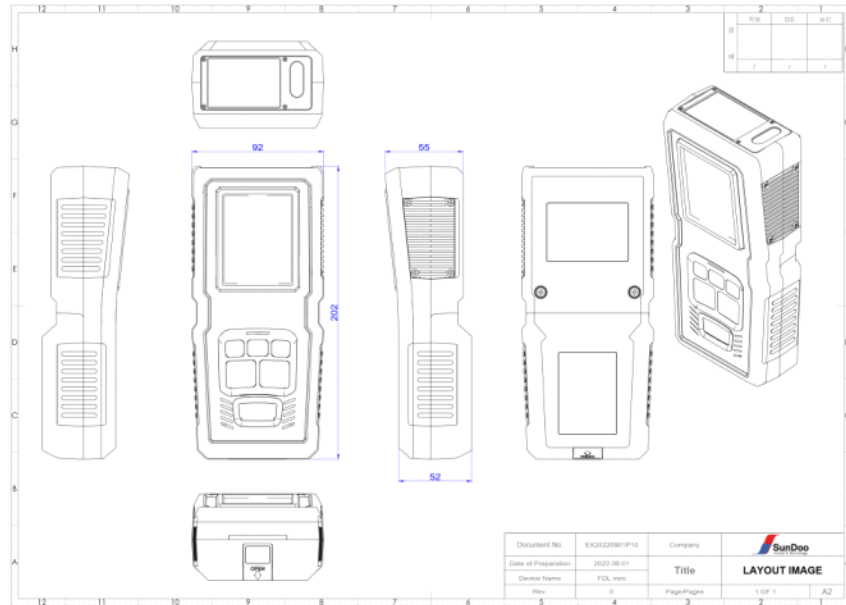
– 95 –

[그림 3-76]은 회로를 구성하고 PCB에 부품을 실장한 것을 나타낸다. 각각의 PCB에는 레이저 다이오드를 탑재하고 LD 파형을 만드는 소자와 파형 크기 조정, LD 중심값 컨트롤, LD 온도 컨트롤, 사운드, 통신/스피커 연결단자 등으로 구성되어 있다.

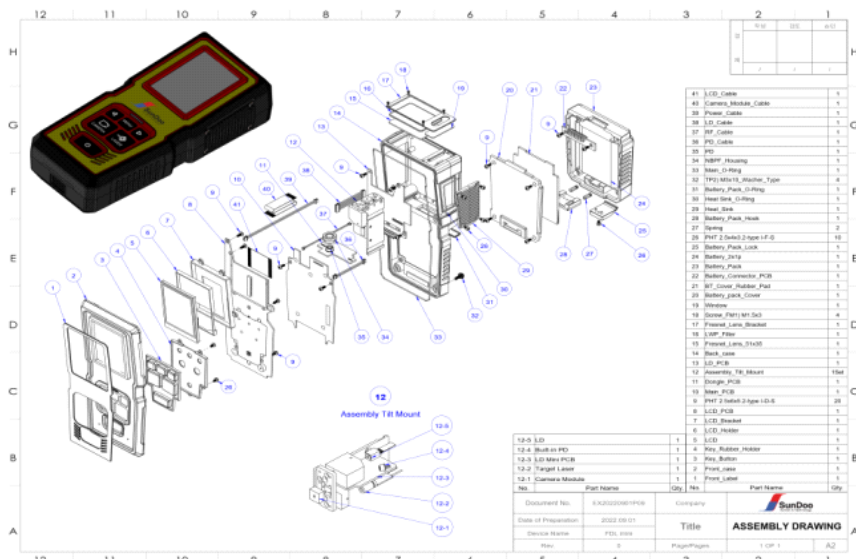


[그림 3-76] PCB 부품실장

[그림 3-77]은 제품 외형 케이스 레이아웃 도면이며, [그림 3-78]은 이에 대한 조립도이다.



[그림 3-77] 외형 케이스 Layout image 도면

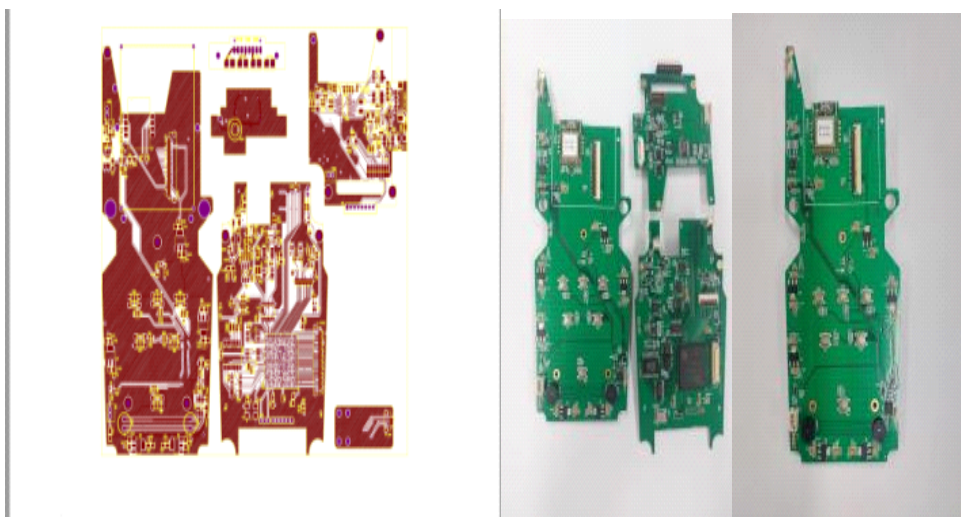


[그림 3-78] 외형 케이스 assembly drawing

[그림 3-79]는 제품의 목업과 사출물이며, [그림 3-80]은 PCB 제작을 위한 아트웍 설계와 부품실장 PCB 제작을 나타낸다.



[그림 3-79] 목업, 사출물



[그림 3-80] 아트웍 설계(左)와 부품실장 PCB(右)

[그림 3-81]은 개발된 제품의 내부 모습이며, [그림 3-82]는 완성된 상용화 제품이다.



[그림 3-81] 개발 제품 내부



[그림 3-82] 상용화 개발제품

제 4 장 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 실험방법 및 실험결과

제 1 절 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 실험방법

1) 종래의 가연성 가스감지기의 실험방법

가연성 가스(combustible gas)는 일반 대기 상태의 온도와 압력에서 가스 또는 증기 상태로 존재하며, 적절한 비율의 공기 또는 산소와 혼합하였을 때, 점화 가능하고 급속히 산화될 수 있는 물질을 가연성 가스라고 하며, 주위 온도 또는 작동온도에서 가연성 혼합물의 생성을 위한 충분한 가스 또는 증기를 발생시키지 못하는 물질과 가연성 액체를 기계적으로 분무시켜 생성된 연무는 가연성 가스로 간주하지 않는다.

가연성 가스감지기의 실험 방법은 KS C 6590 규격에 상세히 정의되어 있다. 이 규격은 가스감지기의 성능을 평가하기 위한 여러 중요한 측면을 다루고 있으며, 이는 교정, 안정화 시간, 정확도, 재현성, 그리고 응답 시간 등을 포함한다.

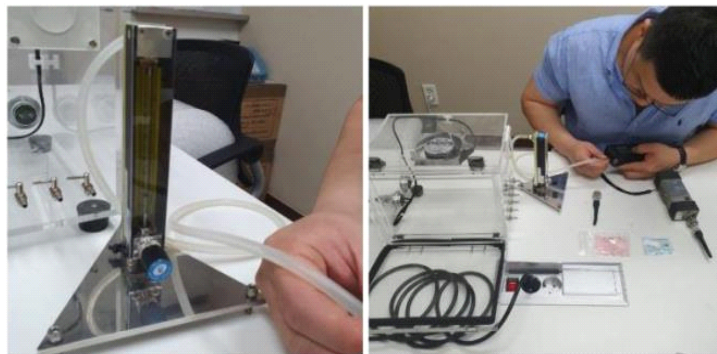
교정(Calibration) 과정에서는 제조사가 제공한 장비와 절차를 엄격히 준수해야 한다. 이때 사용되는 교정 가스의 농도는 기기 풀 스케일의 50%로 설정된다. 감지 대상 가스의 종류에 따라 교정에 사용되는 가스가 달라지는데, 메탄 감지기의 경우 메탄을, 그 외의 가연성 가스 감지기에는 프로판을 사용한다. 특정 가스 감지를 목적으로 하는 기기는 해당 가스나 화학적으로 유사한 가스를 교정에 활용한다.

안정화 시간 측정은 기기의 신뢰성을 확보하는 데 중요한 역할을 한다. 새로운 조건이 적용된 후, 기기가 안정 상태에 도달했는지 확인하는 과정이 필요하다. 5분 간격으로 연속 측정된 세 개의 값이 큰 변화 없이 일정하다면, 기기가 안정화된 것으로 판단한다. 여기서 '큰 변화'란 측정 범위의 2% 또는 5 ppm 이상의 농도 변동을 의미한다.

정확도 평가는 다양한 농도의 시험 가스를 사용하여 수행된다. 감지기는 풀 스케일의 약 10%, 25%, 50%, 75%, 100%에 해당하는 가스 농도에 노출되며, 모든 시험 가스 농도는 허용 오차 $\pm 2\%$ 이내이어야 한다. 계기 또는 출력 신호에 의해 표시되는 허용 오차는 풀 스케일의 $\pm 3\%$ 와 적용 가스 농도의 $\pm 10\%$ 중 큰 값으로 설정된다. 정보 기능만 있는 기기의 경우, 지정된 상한 농도에서는 정보가 작동하고 하한 농도에서는 작동하지 않아야 한다.

재현성 시험은 정확도 시험과 유사한 방식으로 진행되나, 동일한 농도에 대해 3회 반복 노출하는 것이 특징이다. 각 노출 사이의 간격은 180초를 초과하지 않아야 하며, 측정된 값은 정확도 시험과 동일한 허용 오차 범위 내에 있어야 한다. 이 과정을 통해 기기의 일관성 있는 성능을 확인할 수 있다.

응답 시간 측정은 가스감지기의 신속한 반응 능력을 평가하는 중요한 지표이다. 청정 공기에서 갑자기 100% 풀 스케일 농도의 가스에 노출시켰을 때, 12초 이내에 60% 이상의 지시값을 나타내야 한다. 정보 기능만 있는 기기의 경우, 100% LEL 가스 혼합물에 노출 시 10초 이내에 20% LEL 설정 정보가 작동해야 한다.(가연성 가스감지기의 성능시험방법(KS C 6590:2007, 2020))



[그림 4-1] 유량계 활용 가스검지 테스트

한편 이러한 실험방법은 [그림 4-1]과 같이 대기 중에 존재하는 가연성 가스 또는 증기의 농도를 감지하기 위해 사용되는 휴대형, 이동용 및 고정용 전기 기기의 구조, 성능 및 시험에 관한 것으로 규정하고 있으며, 레이저 방

식으로 원거리에서 가스누출을 검지하는 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 테스트에는 적합하지 않으며 이에 대한 KS규격은 존재하지 않는다. 따라서, 휴대형 레이저 메탄누출검지장비에 대하여 GTI 프로젝트에서 제시한 (<https://www.gti.energy/>)에서 수행한 연구방법을 기반으로 누출 테스트를 진행하고 실증데이터를 제시하였다. 또한 개발한 제품의 성능에 대하여 공인 시험기관 시험데이터를 제시하였다.

2) 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 실험방법

가) GTI 프로젝트에서 제시한 메탄누출검지장비의 개념과 용도

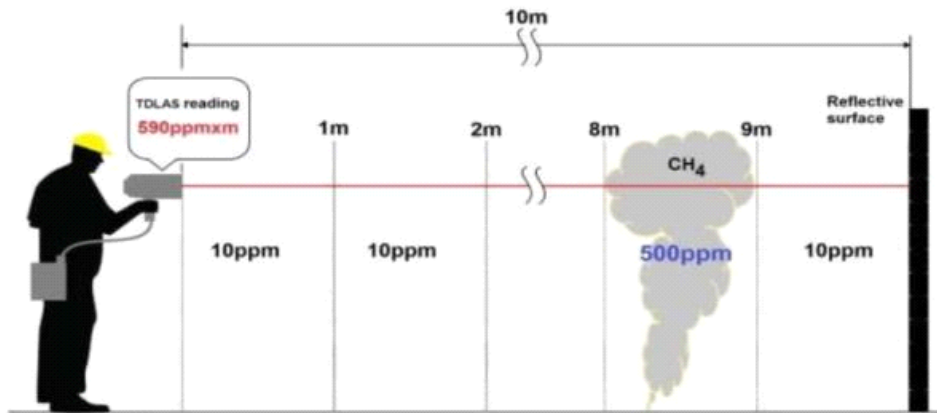
이 휴대형 장비는 가변 다이오드 레이저 흡수 분광법(TDLAS)을 사용하여 측정 장비에서 메탄 기둥(Plume) 뒤의 표면까지 레이저 경로 내의 메탄 농도를 측정하여 "경로 통합" 농도를 ppm-m (parts-per-million-meter) 단위로 표시한다. 이 장비를 활용하면 검사원이 메탄 누출 지역 내부나 누출원에서 멀리 떨어진 지점에서 메탄을 감지할 수 있기에 검사원의 안전을 확보할 수 있다.

본 휴대형 레이저 메탄 검사장비는 메탄 농도를 정확하게 측정할 수 있는 정량적 기기가 아니다. 이는 검사 경로 상에 다양한 크기의 서로 다른 누출이 있을 경우 경로 상에 있는 메탄 누출의 농도를 통합할 가능성이 있기 때문이다.

이 기기의 주된 활용 목적은 누출을 신속하게 식별하고 위치를 파악하여 누출 조사 절차를 시작하는 데 도움이 되는 정성적 기능에 있다. 따라서, 휴대형 레이저 기반 누출 검사장비는 누출 검사원이 넓은 지역을 조사하는 데 필요한 보행량과 시간을 최소화할 수 있으며, 여러 번 접근을 해야 하는 제한 구역(예: 율타리, 습지, 계곡)에서도 쉽게 검사를 할 수 있어서 재 방문에 소요되는 시간과 비용을 최소화하여 비용을 절감하고 잠재적인 규정 미준수 검사 문제를 방지할 수 있다. 가연성 가스검사장비가 모든 가연성 가스를 측정하는 반면에 레이저 기반 기기는 메탄만을 측정하며, 이는 가변 다이오드 레이저흡수 분광법(TDLAS)의 원리가 적용되어 있다.

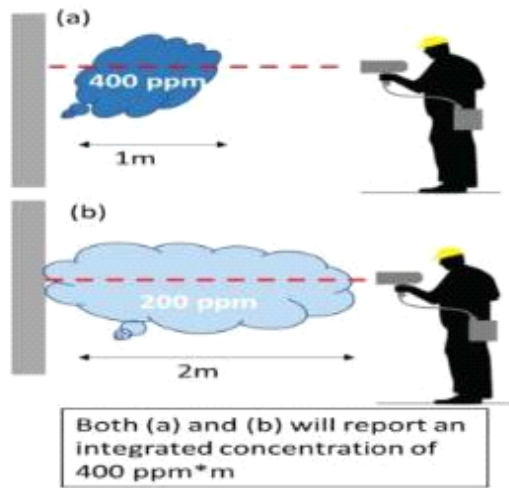
TDLAS의 경우 레이저가 기기에서 바깥쪽으로 방출되어 표면에서 반사되어 다시 기기로 돌아오면 감지기가 경로를 따라 흡수된 레이저의 양을 측정한다. 레이저는 메탄에 해당하는 정확한 파장에 맞춰 반응한다.

휴대형 레이저 시스템을 사용한 측정은 레이저의 전체 경로 길이를 따라 메탄의 농도를 나타내며, 메탄 농도(ppm)에 감지 빔의 길이(m)를 곱한 단위인 ppm-m으로 측정값을 산출한다. [그림 4-2]는 ppm-m 측정값이 계산되는 방법의 예를 보여준다. 이 경우 빔은 10m를 이동하며, 이 중 1m의 메탄 농도는 500ppm이고 나머지 9m의 메탄 농도는 10ppm이다. 이 예에서 TDLAS 센서의 판독값은 $(500\text{ppm} \times 1\text{m}) + (10\text{ppm} \times 9\text{m}) = 590\text{ppm-m}$ 이다.



[그림 4-2] TDLAS 센서를 사용한 측정 예시

이 기기는 메탄 누출을 등급화하거나 정확히 찾아내기 위한 정량적 도구로 설계되지 않았기 때문에 메탄 농도를 파악하면서 이 장비의 특성을 파악하는 것이 중요하다. [그림 4-3]과 같이 크기가 다른 누출도 동일한 경로상에 있을 때 통합 농도(ppm-m)로 인식하기 때문이다. 따라서 휴대형 레이저 검사장비에서 누출 신호가 감지되면 추가 누출 검사를 시작해야 하지만 누출 검사를 위한 유일한 도구가 되어서는 안된다.



[그림 4-3] 경로측정의 예

가) GTI 프로젝트에서 실시한 측정 시험 방법

(1) 외부환경에서 가스누출을 통한 테스트



[그림 4-4] 외부환경 가스누출 테스트 현장

[그림 4-4]처럼 외부 환경에서 측정 가스를 누출한 상태로 측정할 경우, 여러 가지 어려움이 발생한다. 가장 큰 문제는 풍속과 풍향이 측정 결과에 미치는 영향이다.

바람의 세기와 방향은 가스가 퍼지는 방식에 큰 영향을 미쳐 정확한 농도 측정을 어렵게 만든다. 이러한 변수는 통제하기 어려우며, 실외 환경에서는 불규칙하게 변화할 수 있다. 또한, 실외에서는 온도, 습도, 기압 등의 기상 조건도 센서의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로, 외부 환경에서의 측정은 실내 실험실 테스트에 비해 더 많은 불확실성을 동반한다.

결과적으로, 외부 환경에서의 측정을 통해 얻은 데이터는 실내 실험실 테스트에서 얻은 데이터보다 변동성이 크고 신뢰도가 낮을 수 있다. 따라서 실내 실험실 테스트의 통제된 특성은 실외 테스트에서 발생할 수 있는 다양한 변수를 제거하고 조건의 재현성을 테스트할 수 있다.

(2) 실내 실험실 환경에서 테스트

실내 실험실 테스트의 목적은 통제된 환경에서 센서의 성능을 평가하여 풍향, 풍속 등 외부 요인에 의한 변수를 최소화하고, 다양한 시나리오에서 검사장비가 어떻게 반응하는지를 확인하는 데 있다. 이러한 테스트는 실제 환경에서는 재현하기 어려운 다양한 조건을 설정하여 검사장비의 성능을 정밀하게 평가할 수 있는 장점을 제공한다. 이에 GTI프로젝트에서는 일반적인 거리 측정테스트와 함께 다양한 배경 소재, 장애물, 창문, 비 등의 조건에서 어떻게 작동하는지를 평가하였다.

배경 소재 테스트는 다양한 배경이 검사장비의 신호 강도와 메탄 농도 측정에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. 어두운 배경 소재는 신호를 더 많이 흡수하여 낮은 농도 수치를 보고하는 경향이 있었다.

창문 거리 및 이중창 테스트에서는 유리를 통과할 때 검사장비의 성능을 평가하였다. 단일 창은 메탄 농도에 거의 영향을 미치지 않았으나, 이중창은 각도가 중요하여 67.5도로 측정할 때 가장 정확한 결과를 보였다. 이는 유리가 없는 상황과 유사한 성능을 나타냈다.

모의 강우 테스트에서는 비가 내리는 상황에서도 검사장비가 유사하게 작동하며 누출을 식별할 수 있음을 확인하였다. 이는 강수량이 측정에 미치는 영향이 크지 않음을 보여준다. 이상의 측정 결과에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제시하는 개발제품도 배경소재의 경우 어두운 배경의 경우 측정값이 더 적게 나올 것으로 판단되며, 창문 거리 테스트의 경우 단일 창은 영향이 없고, 이중창은 각도가 영향을 미칠것으로 판단된다. 또한 모의 강우 테스트의 경우 거의 영향이 없을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 GTI 프로젝트에서 제시한 방법을 따라 일반적인 거리 측정테스트를 실시하기로 하였다, 거리별 측정은 5회를 하였으며, 메탄 소스는 테들러® 백에 넣어서 1,250ppm-m의 값으로 밀봉하였다. GTI 연구보고서에 의하면 1,750ppm-m의 값으로 밀봉하였는데, 테들러®가 일부 방사선을 걸러내는 것으로 나타났기 때문에 실제 농도인 1,750 ppm-m 보다 낮은 값이 측정되었다. 이러한 테스트를 위해 메탄을 투명한 비닐봉지 TEDLAR BAG (메탄 소스라고 함)에 담아서 아크릴 케이스 내부에 담아 고정하여 두께를 균일하게 하였고, A4용지를 끼워넣어 반사판으로 사용하였다(Chris Moore, 2020)



[그림 4-5] 1250ppm-m TEDLAR BAG

제 2 절 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 실험결과

1) 공인시험기관 시험데이터

공인시험성적서는 본 개발제품인 휴대형 레이저 메탄검지기에 대한 성능 평가 결과를 담고 있다. (Appendix 참조) 시험 결과를 분석해보면, 이 레이저 메탄검지기의 성능은 전반적으로 우수한 것으로 나타났다. 최대 검지 거리는 42m로 측정되어 이 장비가 원거리에서도 효과적으로 메탄가스를 감지할 수 있음을 의미한다. 반응 속도 측정에서는 평균 0.06초의 결과를 보였으며, 이는 가스누출 상황에서 신속한 감지가 가능함을 시사한다.

최소 검지 농도 시험에서는 88.2 ppm-m의 기준 가스 농도에서 감지가 가능한 것으로 확인되었다. 이는 낮은 농도의 메탄가스도 효과적으로 감지할 수 있음을 보여준다. 이를 표로 정리하면 [표 4-1]과 같다

[표 4-1] 공인시험성능평가

최대 검지거리	반응속도	최소검지농도
42m	0.06초	88.2 ppm-m

결과적으로 우수한 검지거리와 빠른 반응 속도, 저농도를 검지하는 민감도 등의 성능을 보여 메탄 가스 누출 감지에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 평가된다.

2) 시험을 통한 측정 실증 데이터

가) 시험환경은 다음과 같다.

온도(Temperature): $(23.0 \pm 0.2)^{\circ}\text{C}$

습도(Humidity): $(47.2 \pm 3.6)\%$ R.H.

시험장소(Location): 고정표준실(Permanent Calibration Lab.)

나) 개발제품과 T사 제품과의 비교분석

1,250ppm-m의 값으로 TEDLAR BAG(메탄 소스라고 함)에 넣어서 아크릴 케이스에 담아서 두께를 균일하게 한 측정 Kit을 사용하여 5회 측정하였고, 타사제품과 비교 테스트를 하였다. 그 측정 결과 데이터는 [표 4-2], [표 4-3]과 같으며, [그림 4-6]은 측정 결과를 도식화한 것이다.

(1) 거리와 측정농도와의 관계

[표4-2]는 개발제품의 거리에 따른 농도측정의 변화를 나타내고 [표 4-3]은 비교대상 T사 제품의 거리에 따른 농도측정의 변화를 나타낸다.

[표 4-2] 개발제품_거리대비 농도 측정값

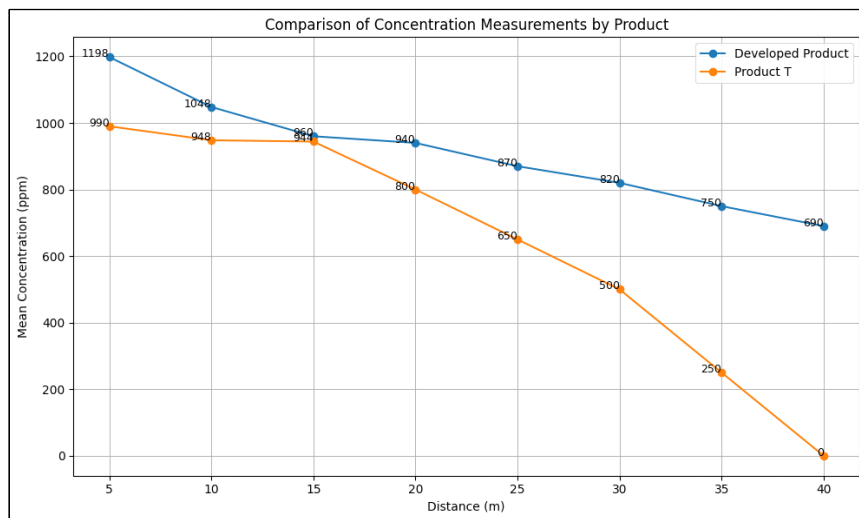
측정 회수 \ 측정 거리	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m	45m
1회	1,200	1,040	960	940	870	820	750	690	X
2회	1,190	1,060	940	910	850	850	780	720	X
3회	1,210	1,050	970	930	880	810	760	700	X
4회	1,200	1,040	980	920	910	790	720	650	X
5회	1,190	1,050	950	920	850	830	730	670	X

[표 4-3] T사 제품_거리대비 농도 측정값

측정 회수 \ 측정 거리	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m	45m
1회	1,000	950	930	800	650	500	250	X	X
2회	990	940	950	830	610	440	200	X	X
3회	1,010	940	950	770	620	480	290	X	X
4회	990	960	920	780	690	520	300	X	X
5회	990	950	900	820	680	540	210	X	X

(2) 두 제품의 비교 측정 결과

위 측정 결과의 평균값을 기준으로 그래프로 나타내면 [그림 4-6]과 같다. 이 그래프는 측정농도 1,250ppm-m로 가스농도를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 개발 제품은 모든 거리에서 T사 제품보다 높은 농도를 측정하며, 특히 더 먼 거리에서도 안정적으로 측정할 수 있다. 이는 개발된 제품이 장거리 측정에 더 효과적임을 나타낸다. 반면, T사 제품은 거리가 멀어질수록 급격히 감소하는 경향을 보이며 40m 이상에서는 측정이 불가능하다. 이러한 결과로 볼 때, 개발된 제품은 장거리 메탄 누출 검지에 유리한 성능을 제공한다.



[그림 4-6] 두 제품의 비교 측정 결과

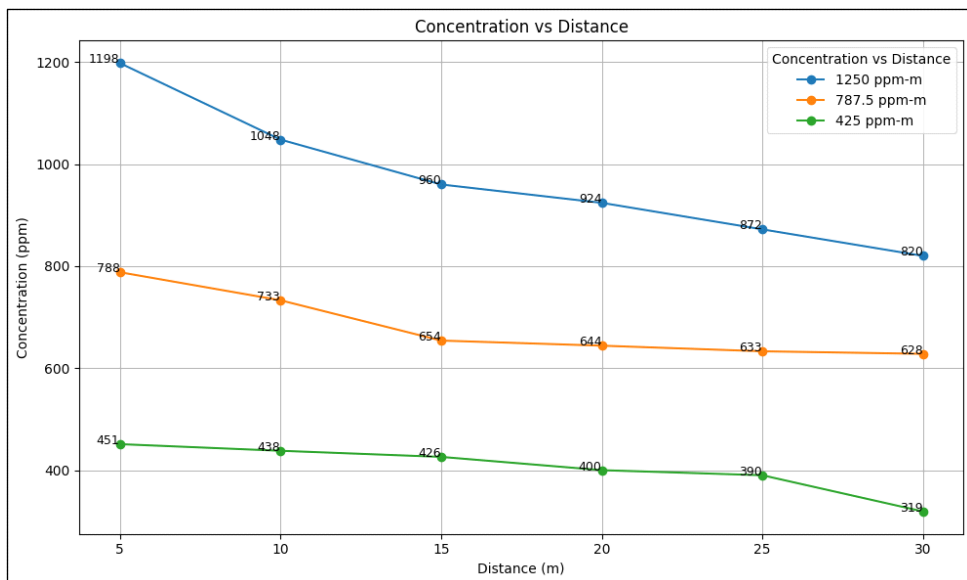
다) 서로 다른 농도측정에 따른 비교분석

[표 4-4]는 레이저 메탄누출검지기를 사용하여 1,250 ppm-m, 787.5 ppm-m, 425 ppm-m 이 세 가지 다른 농도에 대해 5m에서 30m까지의 거리에서 각각 5회 검지 농도를 측정하였고, 이 거리에 따른 메탄 농도 변화를 측정한 평균값을 나타낸다.

[표 4-4] 세 가지 농도측정에 따른 거리별 농도변화

측정 농도 \ 측정 거리	5m	10m	15m	20m	25m	30m	감소 폭
1,250ppm-m	1198	1048	960	924	872	820	378 ppm
787.5ppm-m	788	733	654	644	633	628	160 ppm
425ppm-m	451	438	426	400	390	319	132 ppm

[그림 4-7]은 [표 4-4]를 그래프로 나타낸 것이다.



[그림 4-7] 세 가지 농도측정에 따른 거리별 측정결과

[표 4-4]와 [그림 4-7]의 결과를 분석해보면 다음과 같은 특징을 발견할 수 있다

(1) 거리에 따른 농도 감소 경향성

세 가지 농도 모두에서 거리가 증가함에 따라 측정된 농도가 감소하는 경

향을 보이고 있다. 이는 레이저 메탄누출검지기의 측정 원리와 일치하는 결과이다. 거리가 멀어질수록 레이저 빔이 통과하는 공기 중 메탄 분자와의 상호작용이 감소하여²⁴⁾ 측정값이 낮아지는 것으로 해석된다. 특히 1,250 ppm-m 농도에서 가장 뚜렷한 감소 경향을 보이며, 5m에서 30m로 거리가 증가함에 따라 1198 ppm-m에서 820 ppm-m으로 약 31.6% 감소하였다.

(2) 초기 농도에 따른 감소 폭 차이

초기 농도가 높을수록 절대적인 감소 폭이 더 크게 나타나고 있다. 1,250 ppm-m 농도에서는 378 ppm의 감소를 보인 반면, 425 ppm-m 농도에서는 132 ppm의 감소를 보였다. 그러나 상대적인 감소율을 고려하면, 1,250 ppm-m에서 30.2%, 787.5 ppm-m에서 20.3%, 425 ppm-m에서 31.1%로 나타나 농도에 따른 일관된 경향성은 보이지 않는다.

(3) 측정 정확도 및 신뢰성

측정된 값들이 대체로 초기 설정 농도와 유사하거나 약간 높게 나타나고 있다. 예를 들어, 425 ppm-m 농도의 5m 거리 측정값이 451 ppm-m으로 설정값보다 높게 나타났다. 이는 레이저 메탄누출검지기의 측정 오차 범위 내에 있는 것으로 판단되며, 거리가 증가함에 따라 측정값의 변동이 비교적 일관되게 나타나고 있어, 해당 검지기의 측정 신뢰성이 양호한 것으로 평가된다.

(4) 표준편차 분석

표준편차 분석 결과, 거리가 증가할수록 대체로 표준편차도 증가하는 경향을 보인다. 고농도(1,250 ppm-m)에서는 표준편차의 변화가 더 크게 나타나고 저농도(425 ppm-m)에서는 표준편차의 증가가 상대적으로 완만한데, 이는 저농도에서 측정의 안정성이 더 높음을 나타내는 것이다. 전반적으로, 거리와 농도가 증가할수록 측정값의 차이가 더 크게 나타난다.

24) 거리가 멀어질수록 레이저 빔이 통과하는 경로 상의 메탄 분자 수는 같더라도, 빔의 강도 감소로 인해 메탄 분자와 상호작용하는 광자의 수가 줄어든다. 이로 인해 장비가 감지할 수 있는 메탄 분자와의 상호작용이 감소한다.

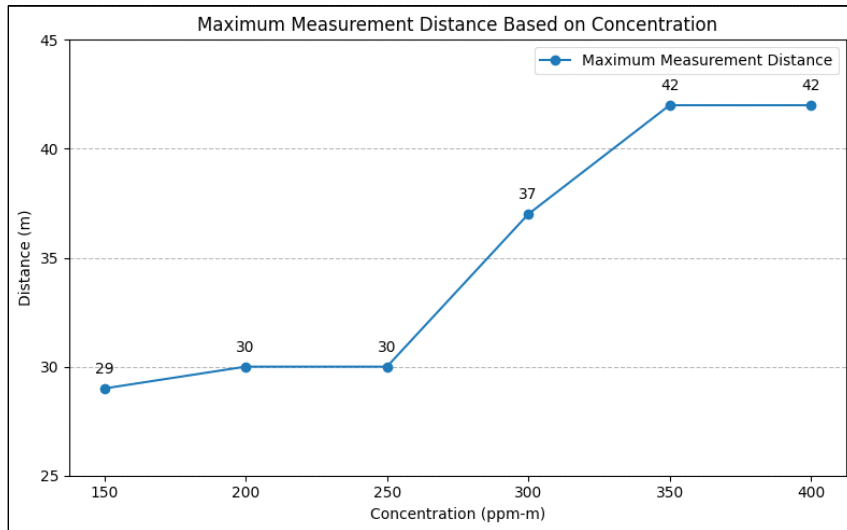
라) 농도에 따른 최대 측정거리

[표 4-5]는 농도에 따른 최대 측정거리를 표로 나타낸 것이다.

[표 4-5] 농도에 따른 최대 측정거리

농도(ppm-m)	150	200	250	300	350	400
거리(m)	29	30	30	37	42	42

[그림 4-8]은 [표 4-5]를 그래프로 나타낸 것이다.



[그림 4-8] 농도에 따른 최대 측정거리

농도 증가에 따른 거리 변화로서는 150 ppm-m에서 200 ppm-m까지는 검지 거리가 거의 변하지 않는다. 300 ppm-m에서 급격히 증가하여 37m가 된다. 350 ppm-m 이상에서는 최대 검지 거리가 42m로 일정하며, 검지 거리는 더 이상 증가하지 않는다.

농도 250ppm-m에서 350ppm-m 사이에서 검지 거리가 급격히 늘어나는 이유로서는 다음의 두 가지로 설명할 수 있다.

첫째, 광학적 특성으로서 특정 농도 범위에서 레이저 빔의 흡수 특성이 달라질 수 있다. 이는 레이저의 파장과 메탄 분자의 상호작용에 따라 발생할 수 있으며, 특정 농도에서는 흡수가 최적화되어 더 먼 거리에서도 검출 가능하다.

둘째, 레이저 다이오드 특성으로서 다이오드의 출력 강도가 특정 농도에서 최적화될 수 있다. 이는 다이오드의 전류와 온도에 의해 영향을 받을 수 있으며, 특정 농도 범위에서 더 높은 감도를 제공할 수 있다.

휴대형 레이저 메탄 누출 검지 장비의 실험 결과는 이 장비가 1654nm의 단적외선을 활용하여 원거리에서 메탄을 효과적으로 검출할 수 있음을 보여준다. 이 장비는 정밀한 정량적 검사보다는 신속하고 편리한 대략적 검사를 목적으로 설계되었다. 이를 통해 최대 40m 거리에서 가스 누출을 감지할 수 있으며, 특히 접근이 어려운 장소에서 유용하게 활용될 수 있다.

공인시험성적서에 따르면, 이 장비는 반응 속도가 빠르고 최소 검지 농도가 낮아 실시간으로 메탄 누출을 감지하는 데 적합하다. 이러한 특성은 고층 아파트의 입상관, 대형 건물의 천장, 교량 아래 배관, 지하 매설 배관 등 접근이 어려운 위험한 장소에서 효과적인 검지를 가능하게 한다.

실험 결과에 따르면, 이 장비는 메탄가스의 존재를 신속하게 파악할 수 있으며, 이는 산업 현장에서의 안전성을 크게 향상시킬 수 있다. 특히, 기존의 전기화학식, 접촉연소식, 반도체식 검지 방법들이 1m이내의 근거리에서만 효과적인 반면, 본 장비는 30m이상 원거리에서 신속하게 가스 누출을 검지할 수 있는 우수한 성능을 발휘한다. 이는 적외선 흡수 방식의 장점을 극대화하여 구현된 결과이다.

결론적으로, 본 연구를 통해 개발된 휴대형 레이저 메탄 누출 검지 장비는 산업 안전과 환경 보호에 기여할 수 있는 실용적인 솔루션으로 평가된다. 이는 단순히 안전사고 예방을 넘어 에너지 효율 향상과 경제적 손실 감소에도 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다. 따라서 본 연구는 다양한 산업 분야에서 그 필요성과 중요성이 매우 크다고 할 수 있다.

제 5 장 결 론

본 연구는 1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫타입 휴대형 레이저 메탄누출검지장비 개발을 목표로 수행되었다. 연구의 주요 성과는 다음과 같다.

- 1) 미니플랫타입 레이저 다이오드 개발: 기존의 버터플라이 타입에 비해 크기와 무게를 대폭 줄이면서도 안정적인 성능을 확보하였다.
- 2) 프레즈넬 렌즈 기술 적용: 광학렌즈를 소형화하여 장비의 전체적인 크기를 줄이고 휴대성을 향상시켰다.
- 3) 고성능 광학필터 설계 및 제작: 측정의 정확도를 높이는 데 성공하였다.
- 4) 메탄검지 회로 및 제어시스템 최적화: 안정적인 동작과 높은 감도를 실현하였다.
- 5) 30m 이상 거리에서의 메탄 누출 감지 능력 확보: 기존 장비들에 비해 크기와 무게가 크게 줄어든 상태에서도 원거리 검지 성능을 달성하였다.

이러한 성과를 통해 본 연구의 목표인 원거리 검지가 가능하면서도 휴대성이 높은 메탄누출검지장비 개발을 성공적으로 달성하였다고 평가할 수 있다.

본 연구의 학술적 기여도는 1654nm 단적외선 파장을 이용한 미니플랫타입 설계 기술을 확립한 것에 있다. 이는 메탄 누출 검지 기술의 새로운 패러다임을 제시한 것으로, 관련 분야의 기술 발전에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

실용적 측면에서 본 연구의 결과물은 천연가스 시설의 안전성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 이는 안전사고 예방은 물론, 에너지 효율 향상, 환경 보호, 경제적 손실 감소 등 다양한 측면에서 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

본 연구의 한계점으로는 실제 현장에서의 장기간 사용에 따른 안정성 검증이 아직 충분히 이루어지지 않았다는 점을 들 수 있다. 또한 다양한 환경 조건에서의 성능 평가가 더 필요할 것으로 보인다. 향후 연구 방향으로서는 다음과 같은 사항들을 제안할 수 있다.

- 1) 장기간 현장 실증 테스트를 통한 제품의 안정성 및 신뢰성 향상
- 2) 다양한 환경 조건(온도, 습도, 풍속 등)에서의 성능 평가
- 3) 인공지능 기술을 접목한 가스 누출 패턴 분석 및 예측 기능 추가
- 4) 메탄 이외의 다른 가연성 가스나 유해 가스 검출로 기능 확장

결론적으로, 본 연구는 첨단 광학 기술과 전자 제어 기술의 융합을 통해 실용적이고 효과적인 가스 누출 감지 솔루션을 제시했다는 점에서 큰 의의가 있다. 향후 지속적인 연구 개발을 통해 더욱 안전하고 효율적인 에너지 인프라 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 가스센서 동향 Issue Report. (2021). 『연구개발특구진흥재단』.
- 가연성 가스감지기의 성능시험방법(KS C 6590:2007). (2020). 『국가기술표준원』.
- 곽민환, 유용구, 류한철, 윤두협. (2006). 테라헤르츠파 기술의 현황과 전망. 『전자통신동향분석』, 21(4), 24-33.
- 권정락, 박규태, 류근준, 윤명섭. (2008). 레이저 광학 시스템을 이용한 메탄 가스 감지기의 설계. 『KIGAS 컨퍼런스』, 95-99.
- 김희연, 김태현. (2014). 적외선 센서 소재 및 응용현황. 『세라미스트』, 17(4), 61-71.
- 남현. (2021). "프레넬 렌즈를 적용한 휴대형 레이저 메탄 검지기 광학계의 성능평가 및 개선". 숭실대학교 대학원 석사학위논문.
- 박규태, 류근준, 권정록. (2008). $3.2\ \mu\text{m}$ 을 이용한 중적외선 메탄 가스 누출 감지기의 개발. 『KIGAS』, 12(2), 48-52.
- 박규태, 유근준, 권정락. (2010). 중적외선 광센서를 이용한 가스누출검지시스템 개발 연구. 『가스안전』, 12(1), 32-38.
- 박영진. (2024). "레이저 가스 검지기의 정밀도 유지를 위한 실시간 모니터링 및 캘리브레이션 간소화 기법에 관한 연구". 숭실대학교 대학원 석사학위논문.
- 백영삼. (2018). "적외선분광법 기반 암모니아 누출검지 및 분석 기법". 숭실대학교 대학원 석사학위논문.
- 백영삼, 홍정완. (2024). 단적외선 레이저를 이용한 메탄가스 누출 검지 장비 개발. 『KIGAS』, 28(1), 53-58.
- 성혁기. (2011). 이중 전극 구조를 이용한 반도체 레이저의 직접 변조 성능 향상. 『한국통신학회논문지』, 36(1), 48-53.

- 안재현, 김용모. (2004). 파장변조 광흡수 분광법을 이용한 농도 측정 기법. 『한국액체미립화학회지』, 9(4), 66-76.
- 이종락 (역). (1995). 『광센서와 그 사용법』. 서울: 도서출판 세화.
- 이종진, 유정희, 강현서, 고재상. (2004). 레이저다이오드 모듈 냉각용 TEC 소비전력 특성. 『마이크로전자 및 패키징학회지』, 11(3), 1-7.
- 정병호, 이강연, 박주훈, 문은아, 이상현, 김대곤. (2012). CPV 모듈용 적용 SOG 렌즈의 특성. 『대한전기학회』, 61(2), 97-102.
- 정보통신기술용어해설. (2024). IR Infrared Radiation 적외선. 『한국정보통신 기술협회』.
- 정용택. (2014). 『적외선 센서의 최신 기술동향』. 서울: 홍릉과학출판사.
- 정용택. (2019). 적외선 센서의 최신 기술 동향. 『정보통신기획평가원 주간기술동향』, 1894호, 2-15.
- 조경화, 류근준, 김응수. (2011). 분광특성을 이용한 소형의 메탄 가스 감지 시스템. 『센서학회지』, 20(1), 53-57.
- 조남욱. (2014). 원거리 유해가스 검출 및 모니터링 기술 개발. 『가스안전지』, 277, 4-7.
- 중소기업 기술로드맵 2018-2020. (2017). 『중소벤처기업부』.
- 차세대 레이저산업의 기술 동향과 광(光) 관련 부품 시장 분석. (2024).
- 한국과학기술정보연구원. (2022). 가스센서. 『ASTI MARKET INSIGHT』, 2022-069.
- 한송희. (2014). "레이저 다이오드". 목원대학교.

2. 국외문헌

- Barry, H. R., Corner, L., Hancock, G., Peverall, R., & Ritchie, G. A. D. (2001). Cavity-enhanced absorption spectroscopy of methane at $1.73\ \mu\text{m}$. *Chemical Physics Letters*, 333(3-4), 285-289.
- BCC Research. (2014). 『Terahertz Radiation Systems: Technologies and Global Markets』. Wellesley, MA: BCC Research.

- BYJU'S. (2024). Beer–Lambert Law: Statement, Derivation, Formula, Limitations, FAQs. Retrieved from <https://byjus.com>
- Chris Moore. (2020). 『Evaluation of Handheld Laser Methane Detection Technologies』. Des Plaines, IL: Gas Technology Institute.
- Eblana Photonics. (2020). 1654nm DM LASER (EP1654–DM–B) Typical optical spectrum at 25° C. Retrieved from <https://eblanaphotonics.com>
- Edmund Optics. (2024). Optical Filters. Retrieved from <https://www.edmundoptics.co.kr>
- ElProCus. (2024). Rayleigh Scattering: Losses and Differences with Mie Scattering. Retrieved from <https://www.elprocus.com>
- FLIR. (2024). A Perfect Tool for Finding Wildlife. Retrieved from <https://www.flir.com>
- Fresnel Technology. (2019). 『Transmittance of POLY IR® 5 material as a function of wavelength』. Boston: Fresnel Technology.
- Frish, M. B., Wainner, R. T., Stafford–Evans, J., Green, B. D., Allen, M. G., Chancey, S., Rutherford, J., Midgley, G., & Wehnert, P. (2005). Stand–off sensing of natural gas leaks: Evolution of the Remote Methane Leak Detector (RMLD). *Proceedings of LEO/QELS 2005*, 3, 1941–1943.
- FUJIFILM VisualSonics. (2024). The Photoacoustic Effect. Retrieved from <https://www.visualsonics.com>
- Harris, D. C. (2010). 『Quantitative Chemical Analysis』. New York: W. H. Freeman and Company.
- Hu, B. B., & Nuss, M. C. (1995). Imaging with terahertz waves. *Optics Letters*, 20(16), 1716.
- Iseki, T. (2004). Techniques for methane gas leak detection using a near–infrared diode laser. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17(1), 59–65.

- Jadin, M. S., & Ghazali, K. H. (2014). Gas Leakage Detection Using Thermal Imaging Technique. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, 15(4), 301–306.
- Kondo, Y., Asobe, M., & Oohashi, H. (2009). Light source technologies for sensing applications. *NTT Technical Review*, 7(1), 1–6.
- KQED Science. (2013). PG&E Tests Tech Adapted from NASA's Mars Rover. Retrieved from <https://www.kqed.org/science>
- Massie, C., Stewart, G., McGregor, G., & Gilchrist, J. R. (2006). Design of a portable optical sensor for methane gas detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(2), 830–836.
- mfgrobots.com. (2024). Manufacturing Robots Technology. Retrieved from <https://mfgrobots.com>
- Milonni, P. W., & Eberly, J. H. (1988). 『Lasers』. New York: Wiley Interscience.
- nanoplus GmbH. (2024). Distributed Feedback Lasers 1300nm –1650nm. Retrieved from <https://nanoplus.com>
- Nielsen, H. H., & Nielsen, K. (1932). The Near Infrared Absorption Spectrum of Methane. *Physical Review*, 39(1), 83–85.
- O'Keefe, A., & Deacon, D. A. G. (1988). Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources. *Review of Scientific Instruments*, 59(12), 2544–2551.
- Optics.org. (2019). Metamaterial devices market 'to exceed \$10BN by 2030'. Retrieved from <https://optics.org>
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., & Vyvyan, J. A. (2014). 『Introduction to Spectroscopy』. Boston: Cengage Learning.
- RP Photonics. (2024). Optical Filters. Retrieved from <https://www.rp-photonics.com>
- Spectrex. (2024). About Open Path Gas Detection Technology. Retrieved from <https://www.spectrex.net>

- Sundnas, C. (2024). How Can LiDAR Help The Natural Gas Industry To Detect Leaks. Retrieved from <https://www.geoweekevents.com>
- The latest trends in nanophotonics. (2024.). Retrieved from <https://www.degruyter.com>
- Wolfgang Zeller, Lars Naehle, Peter Fuchs, Florian Gerschuetz, Lars Hildebrandt, & Johannes Koeth. (2010). DFB Lasers Between 760 nm and 16 μ m for Sensing Applications. *Sensors*, 10(4), 2492–2510.
- Xie, W. T., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2011). Numerical and experimental analysis of a point focus solar collector using high concentration imaging PMMA Fresnel lens. *Energy Conversion and Management*, 52(6), 2417–2426.

Appendix

시험 성적서

TEST REPORT

RIS-ET

표준환경시험연구원 주식회사

인천광역시 남동구 호곡로50, 5층 527호
(고잔동, 엘아이지식산업센터)
TEL : 032)240-5300, FAX : 032)240-5304

성적서번호(Test Report No)
R22-0600-T002

페이지 (1) / (총 6) Page of Pages

1. 의뢰자(Client)

- 기명명(Name) : 선두전자(주)
- 주소(Address) : 서울시 금천구 불광로 278, 1004호(가산동, SJ테크노빌)

2. 측정기(Calibration Subject)

- 기기명(Description) : 레이저매탄검지기
- 제조회사 및 형식(Manufacturer and Model Name) : 선두전자 / 휴대형
- 기기번호(Serial Number) : NONE

3. 시험일자(Date of Testing) : 2022. 04. 22

4. 시험환경(Environment)

- 온도(Temperature) : (23.0 ± 0.2) °C 습도(Humidity) : (47.2 ± 3.6) % R.H.
- 시험장소(Location) : ☒ 고정표준실(Permanent Calibration Lab.) ☐ 이동시험(Mobile Lab.) ☐ 현장시험(On Site Testing)
(Address : 인천광역시 남동구 호곡로 50, 5층 527호 (고잔동, 엘아이지식산업센터))

5. 시험방법(Test method)

- 위의 기기는 일반 가스측정기 시험지침서(RIS-ET-TI-01)에 따라 시험 하였습니다.

■ 시험에 사용한 표준장비 명세 (List of used standards/specifications)

기기명 Description	제조회사 및 형식 Manufacturer and Model	기기번호 Serial Number	차기교정예정일자 The due date of next Calibration	교정기관 Calibration laboratory
thermometer	CEM (DT-172)	10059766	2022. 12. 02	KTICC
barometer	TESTO (511)	39104224/007	2022. 12. 02	KTICC
OPTICAL SPECTRUM ANALYZER	YOKOGAWA (AQ6319)	91H923630	2023. 04. 12	KTICC
CH ₄ / Air	RIGAS (10 L, 1.26 cmol/mol)	2107PR00435	2022. 07. 29	RIGAS
STOP WATCH	CASIO (HS-3)	603Q23R	-	KTICC

6. 시험결과(Test result) : 시험결과 참조(Refer to test result)

7. 측정불확도(Measurement uncertainty) : 시험결과 참조(Refer attached file)

확인 (Affirmation)	작성지 (Measurement Performed by) 성명 (Name) : 김 이 랑	승인자 (Approved by) 직 위 (Title) : 기술책임자(장) 성명 (Name) : 류 재 수
---------------------	---	--

본 성적서는 고객의 요청에 의해 측정된 결과이며, 시험결과에 대하여는 인건, 조속, 기타 법적요건으로 사용할 수 없으며, KOLAS와는 관련 없음을 명시 함.

2022. 04. 26

표준환경시험연구원 주식회사 대표이사

Research Institute of Standard for Environmental Testing

(주) 이 성적서는 측정기의 정밀정확도에 영향을 미치는 요소(과부하, 온도, 습도 등)의 급격한 변화가 발생한 경우에는 무효가 됩니다.
(Note) If any significant instability or other adverse factor(overload, temperature, humidity ect.) manifests itself before, during or after calibration, it is likely to affect the validity of the calibration.

RIS-ET-TI-01-01(0)

※ 성적서 전위여부 확인 : 당사 홈페이지(www.riset.re.kr) 및 QR코드 참조

시험결과

TEST RESULT

RISET

표준환경시험연구원 주식회사

인천광역시 남동구 호곡로50, 5층 527호

(고잔동, 열아이지식산업센터)

TEL : 032)240-5300, FAX : 032)240-5304

성적서번호(Test Report No)

R22-0600-T002

페이지 (2) / (총 6) Page of Pages

◇ 기 기 명(Description) : 레이저메탄검지기

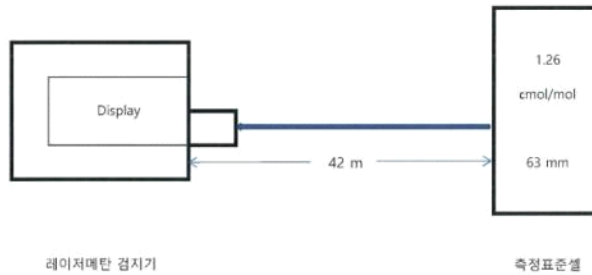
◇ 제작회사 및 형식(Manufacturer and Model Name) : 선두전자 / 휴대형

◇ 기기번호(Serial Number) : NONE

1. 시험결과(Test result)

1-1. 최대 검지 거리

시험가스	기준가스농도 Reference gas concentration	시험기준 Limit	표시방식 Display method	시험결과(평균값) Test Result(Average)
CH ₄ / Air	793.8 ppm x m	41 m	m	42 m



< 1-1. 최대 검지거리 측정 방법 >

시험결과

TEST RESULT

RISET

표준환경시험연구원 주식회사

인천광역시 남동구 호곡로50, 5층 527호

(고잔동, 엘아이지식산업센터)

TEL : 032)240-5300, FAX : 032)240-5304

성적서번호(Test Report No)

R22-0600-T002

페이지 (3) / (총 6) Page of Pages

◇ 기기 명(Description) : 레이저메탄검지기

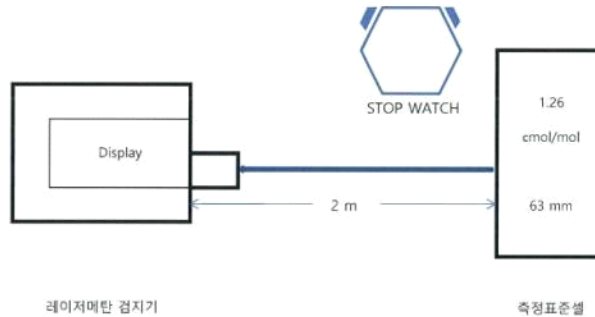
◇ 제작회사 및 형식(Manufacturer and Model Name) : 선두전자 / 휴대형

◇ 기기번호(Serial Number) : NONE

1. 시험결과(Test result)

1-2. 반응 속도

시험가스	기준가스농도 Reference gas concentration	시험기준 Limit	표시방식 Display method	시험결과(평균값) Test Result(Average)
CH ₄ / Air	793.8 ppm x m	0.09 s	s	0.06 Sec



< 1-2. 반응 속도 측정 방법 >

시험결과

TEST RESULT

RISET

표준환경시험연구원 주식회사

인천광역시 남동구 호곡로50, 5층 527호
(고잔동, 열아이지식산업센터)

TEL : 032)240-5300, FAX : 032)240-5304

성적서번호(Test Report No)

R22-0600-T002

페이지 (4) / (총 6) Page of Pages

◇ 기기 명(Description) : 레이저메탄검지기

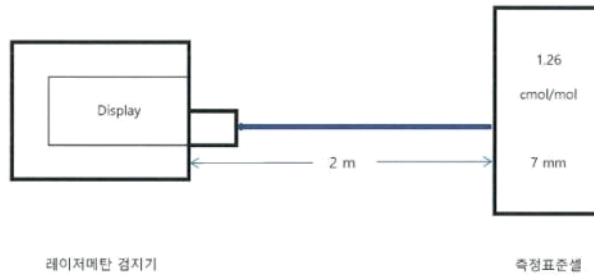
◇ 제작회사 및 형식(Manufacturer and Model Name) : 선두전자 / 류대형

◇ 기기번호(Serial Number) : NONE

1. 시험결과(Test result)

1-3. 최소 검지 농도

시험가스	기준가스농도 Reference gas concentration	시험기준 Limit	표시방식 Display method	시험결과(평균값) Test Result(Average)
CH ₄ / Air	88.2 ppm x m	90 ppm x m	ppm x m	검지



< 1-3. 최소 검지 농도 측정 방법 >

시험결과

TEST RESULT

RISET

표준환경시험연구원 주식회사

인천광역시 남동구 호곡로50, 5층 527호

(고잔동, 엘아이지식산업센터)

TEL : 032)240-5300, FAX : 032)240-5304

성적서번호(Test Report No)

R22-0600-T002

페이지 (5) / (총 5) Page of Pages

◇ 기 기 명(Description) : 레이저메탄검지기

◇ 제작회사 및 형식(Manufacturer and Model Name) : 선두전자 / 휴대형

◇ 기기번호(Serial Number) : NONE

1. 시험결과(Test result)

1-4. LD Peak Wavelength

제작회사 Manufacturer	기기번호 Serial Number	시험기준 Limit	표시방식 Display method	시험결과(평균값) Test Result(Average)
선두전자	none	1 654 ± 2 nm 이내	nm	1 654 ± 1 nm

시험결과

TEST RESULT

RISET

표준환경시험연구원 주식회사

인천광역시 남동구 호곡로50, 5층 527호
(고잔동, 열아이지식산업센터)

TEL : 032)240-5300, FAX : 032)240-5304

성적서번호(Test Report No)

R22-0600-T002

페이지 (6) / (총 6) Page of Pages

- ◇ 기 기 명(Description) : 레이저메탄검지기
- ◇ 제작회사 및 형식(Manufacturer and Model Name) : 선두전자 / 휴대형
- ◇ 기기번호(Serial Number) : NONE

1. 시험결과(Test result)

1-5. LD 정확도

제작회사 Manufacturer	기기번호 Serial Number	시험기준 Limit	표시방식 Display method	시험결과(평균값) Test Result(Average)
선두전자	none	± 1 nm 이내	nm	± 0.5 nm

- ※ 상기 측정기는 제조사에서 제공해준 측정 방법에 따라 측정한 결과임.
- ※ 상기 측정기는 건식 표준가스를 사용하여 시험하였으므로 습도 변화에 따라 값은 변화할 수 있음.
- ※ 상기 측정기는 (1 013.25 ± 20) hPa 기준에서 시험하였으므로 압력 변화에 따라 값은 변화할 수 있음. 끝.

ABSTRACT

Development of mini flat type portable laser
methane leak detection device using a 1654nm
short infrared wavelength

Baek, Young-sam

Major in Smart Convergence Consulting

Dept. of Smart Convergence Consulting

The Graduate School

Hansung University

This study is about the development of a mini-flat type handheld laser methane leak detection device using 1654nm short infrared wavelength. As natural gas usage is increasing rapidly around the world and related accidents are occurring frequently, there is a need for a device that can effectively detect methane leaks from a distance.

In this study, we first analyzed the characteristics of infrared rays and the optical properties of methane gas, and examined the methane gas leak detection method based on the Beer-Lambert law. In addition, we conducted prior research on existing methane gas leak detection methods and TDLAS technology. Based on this, detailed technologies were studied for the development of miniaturized methane leak detection equipment of mini-flat type.

The major developments include, first, the development of a mini-flat type laser diode. Compared to the existing butterfly type, the size and weight were significantly reduced while securing stable performance. Second, the optical lens was miniaturized by applying Fresnel lens technology. This reduces the overall size of the equipment and improves portability. Third, a high-performance optical filter was designed and manufactured to improve measurement accuracy. Fourth, we optimized the methane detection circuit and control system to realize stable operation and high sensitivity.

By integrating these technologies, a mini-flat type portable laser methane leak detector was finally constructed. The developed device can detect methane leaks at a distance of more than 30 meters, and its size and weight are significantly reduced compared to existing devices, making it easy to use in the field.

To verify the performance of the developed equipment, various experiments were conducted in conjunction with testing at an accredited testing center. The performance of the device was tested by distance and concentration, and it showed equal or better performance in comparison with existing commercial products.

The mini-flat type portable laser methane leak detection device developed through this research is expected to significantly improve the safety of city gas supply and usage facilities.

The significance of this research is that it has presented a solution that can detect gas leaks quickly and effectively from a distance through the convergence of advanced optical technology and sensing technology. It is expected to contribute to building a safer and more efficient energy infrastructure through continued research and development.

【key words】 1654nm, mini flat, remote, methane, laser.