

단적외선 레이저를 이용한 메탄가스 누출 검지 장비 개발

백영삼 · †홍정원*

한성대학교 대학원 스마트융합컨설팅학과 박사과정, *한성대학교 산업시스템공학부 교수
(2023년 11월 10일 접수, 2024년 3월 14일 수정, 2024년 3월 26일 채택)

Development of Methane Gas Leak Detector by Short Infrared Laser

Young Sam Baek · †Jung Wan Hong*

Ph.D Student, Dept. of Smart Convergence Consulting, Hansung University, Korea
*Professor, Division of Industrial and Systems Engineering, Hansung University, Korea
(Received November 10, 2023; Revised March 14, 2024; Accepted March 26, 2024)

요약

산업의 발전과 생활 수준의 향상으로 인하여 전 세계적으로 천연가스의 사용량은 지속해서 증가하고 있으며, 이에 따른 발전소, 저장시설, 공급배관망 확충 등 관련 산업시설도 지속해서 증가하고 있다. 천연가스는 편리하고 환경오염이 없는 청정연료이지만 누출로 인한 사고 발생 시, 인명피해는 물론 대규모 재산상 손해, 지구 온실효과에 부정적인 영향을 초래한다. 중대재해 처벌 등에 관한 법률 등도 무거운 상황에서 더욱 안전을 기해야 할 상황이다.

이에 레이저 기반 흡수 분광분석법의 원리를 적용하여 최대 거리 30m에서 누출되는 메탄 농도를 검출할 수 있는 원거리 휴대용 메탄 누출 가스 검지 시스템을 개발하여 그 효과성을 검증하였다.

Abstract - Due to the development of industry and improvement of living standards, the amount of natural gas used in the world is constantly increasing, and related industrial facilities such as power plants, storage facilities, and supply pipelines are constantly increasing. Natural gas is a convenient and clean fuel that does not pollute the environment, but in the event of an accident due to leakage, it can cause human casualties, large-scale property damage, and negative effects on the global warming effect. In addition to the severe penalties under the Severe Disaster Punishment Act, it is necessary to ensure safety. Therefore, by applying the principle of laser-based absorption spectroscopy, we developed a long-range portable methane leakage gas detection system that can detect the concentration of methane leaking from a distance of up to 30 meters and verified its effectiveness.

Key words : Short Infrared, 1,654nm, Gas explosion, Gas safety, Laser Absorption

I. 서론

산업의 발전과 생활 수준의 향상으로 인하여 전 세계적으로 천연가스 및 셰일가스의 사용량은 지속해서 증가하고 있다. 국내의 천연가스 사용량은

2031년까지 연간 0.8%씩 지속해서 증가할 것으로 예상되며 이에 대한 안전사고 예방은 중요한 사안이 되고 있다.

또한 기후변화의 문제가 심각해짐에 따른 세계적인 탄소중립 정책에 따라서 탈석탄의 상당한 부분을 LNG가 대체하면서 LNG 발전소와 공급 배관망 확충 등 관리시설은 많이 증가하고 있다. 국내의 경우 해외에서 수입된 LNG는 평택, 인천, 통영,

†Corresponding author: na03100@sdtron.co.kr
Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

삼척 LNG 생산기지 등에서 기화시켜 고압 및 중압 배관을 통하여 화력발전소와 도시가스사 등으로 공급되며, 산업용 및 가정용은 도시가스사의 저압 배관을 통하여 공급된다.

20~30년 이상 지난 노후배관과 신규 도시가스의 공급 증가로 해마다 배관이 연장되고 있으며 이에 따른 효율적인 관리의 필요성이 증대되고 있다. 미국 DOE(Department of Energy)는 천연가스 생산지에서 2%가 누출 상태로 낭비되고 있다고 보도하고 있으며, 국내의 경우 한해 에너지 수입액은 50조 정도로서 위 자료에 따르면 연간 1조에 이르는 천연가스가 낭비되고 있는 것으로 파악된다[1].

또한 누출로 인한 빈번한 사고와 그 위험성이 상존하는 것으로 최근 인천 LNG 저장탱크 누출 사고로 인한 가스 방출량 28.6톤, 진단 비용 20억, 보수 비용 650억 원 추정 (2017년 11월), 연소 탑 불기동 사고(2020년 4월) 및 가스누출 사고(2021년 4월)가 발생한 것으로 보고되고 있다[2]. 천연가스는 편리한 청정에너지이지만 가스누출 시 폭발사고와 이산화탄소보다 28배나 높은 온난화 효과를 발생시키는 것으로 각국에서는 다양한 방법으로 천연가스 누출로 인한 피해를 예방하고자 노력하고 있다.

한편 천연가스의 주성분은 메탄 91.59%, 에탄 5.51%, 기타 2.9%로써 메탄이 주성분으로서 본 논문에서는 적외선 분광분석법 원리에 기초하여 천연가스 누출을 조기에 감지하고 사고를 미연에 방지하기 위하여 원거리에서 효과적으로 도시가스 누출 여부를 검지할 수 있는 시스템을 제안하고 그 분석 방법을 제시하고자 한다.

II. 본 론

본 장에서는 기존의 메탄 누출 검지 방법을 소개하고 메탄의 광학적 특성과 이에 따른 새로운 누출 검지 방법을 제안한다.

2.1. 기존의 누출 검지 방법

메탄가스가 누출되면 폭발이나 화재의 위험을 야기할 수 있으며, 재산상의 피해는 물론 막대한 인명피해를 가져올 수 있다. 또한 가스 누출로 인해 대기 중에 유해 물질이 증가하여 호흡기 문제, 알레르기 반응, 심장 및 순환계 질환 등의 건강 문제를 유발할 수 있다.

이러한 피해를 예방하기 위하여 천연가스누출 검지 및 관리는 매우 중요하다[3]. 가스의 누출을 검지하기 위해 전기화학식, 반도체식, 접촉연소식 및 적외선 흡수 방식 등 다양한 가스누출 검지기가 개발되어 사용되고 있으며 그 특징은 Table 1과 같다. 기존의 대부분 제품은 가스배관 근처에서 1m 내외의 호스를 이용하여 직접 흡입하여 가스 누출 상태를 측정해야 하므로 검사 위치가 높은 곳이나 사각지대의 가스 배관은 검사하기 어려운 문제점이 있다.

2.2. 흡수 분광분석법 기반 메탄 누출 검지 기법

태양으로부터 오는 빛은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 가시광선, 자외선, 적외선으로 분류된다. 가시광선은 눈으로 볼 수 있는 색을 갖는 광선이며, 자외선과 적외선은 눈으로 볼 수 없다. 적외선은 일반적으로 물체의 절대온도에 반비례하여 최대

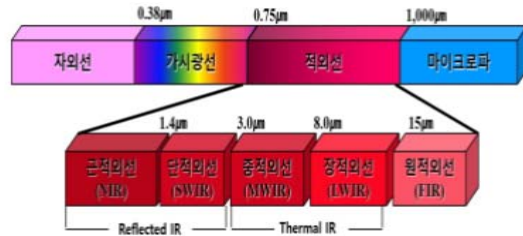


Fig. 1. Infrared range in electromagnetic waves.

Table. 1. Existing methane leak detection method

Methods	Features
Electrochemical	Restricts the flow of the gas to be detected to the detection electrode
Semiconductor	Uses changes in the density of conduction electrons on the surface of semiconductors
Contact combustion	Using the change in resistance of platinum wire to temperature Infrared absorption method
Infrared absorption method	distributed and non-distributed methods

발광 파장을 갖는 빈의 변위법칙에 따른 열 적외선 방사도에 따라서 근적외선, 단파장 적외선, 중간 적외선, 장파장 적외선, 원적외선으로 나누어진다.

전자기와 스펙트럼에서 적외선은 Fig. 1과 같이 0.75 μm 에서 1,000 μm 파장 영역에 해당하며, 적외선의 응용 목적에 따라 0.75~1.4 μm 대역의 근적외선(Near Infra Red: NIR), 1.4~3.0 μm 대역의 단적외선(Short Wavelength InfraRed: SWIR), 3.0~8.0 μm 대역의 중적외선(Middle Wavelength InfraRed: MWIR), 8.0~14 μm 대역의 장적외선(Long Wavelength InfraRed: LWIR), 그리고 15 μm 보다 긴 파장 대역의 원적외선(Far InfraRed: FIR) 등 5개 영역으로 구분할 수 있다. NIR과 SWIR 영역은 매우 높은 고온 영역에 해당하며, 1,000 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도 측정에 사용되며, 영상 획득을 할 때는 반사되어 온 적외선을 이용하기 때문에 반사형 적외선(Reflected InfraRed)이라 한다. 그리고 MWIR과 SWIR은 상온에서부터 1,000 $^{\circ}\text{C}$ 이하의 온도 측정에 사용되며, 영상 획득을 할 때는 물체의 온도에 의해 스스로 복사하는 적외선을 이용하기 때문에 열형 적외선(Thermal InfraRed)이라 한다[4].

단적외선(SWIR) 중에서도 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1,654nm 파장은 메탄가스가 특히 강하게 흡수되는 파장이다[5].

메탄가스의 흡수 영역은 센서 및 분광기와 같은 기기를 사용하여 감지될 수 있다. 1,654nm 파장에서 메탄가스에 의해 흡수되면, 이를 감지하여 메탄 농도를 측정할 수 있다. 이는 환경 모니터링, 대기 오염 감지, 그리고 온실가스 배출량 추적 등에 유용하게 활용될 수 있다.

적외선분광법(Infrared Spectrometry)의 기본 원리는 분자의 진동에 바탕을 두고 있다. 분자가 진동 운동을 일으키기 위해서는 원자의 종류에 따라 고유한 진

동 주파수에 해당하는 빛 에너지를 흡수해야 한다는 점을 이용한다[6]. 적외선분광법에는 주로 단적외선(SWIR) 영역이 사용된다. 적외선 분광법에 의한 감지의 원리는 Lambert-Beer 법칙에 바탕을 두고 있다[7].

Lambert-Beer의 법칙(또는 Beer-Lambert의 법칙)은 물질의 농도와 흡수도(또는 투과도) 사이의 관계를 설명하는데 사용되는 법칙이다. 이 법칙은 광학적 현상을 기반으로 하며, 다음과 같이 표현된다.

$$A = \epsilon cl \quad (1)$$

(A: 물질의 흡수도(또는 투과도), ϵ : 물질의 흡수 계수(또는 투과계수), c: 물질의 농도, l: 물질을 통과하는 광선의 경로 길이)

Lambert-Beer의 법칙은 다음 가정에 기반한다. 즉, 광선과 물질 사이의 상호작용은 흡수에 의해 일어난다. 물질의 농도가 적절한 범위 내에서 선형적인 관계를 가진다. 광선이 물질을 투과할 때 흡수도는 경로 길이와 물질의 농도에 비례한다.

이와 같이 Lambert-Beer의 법칙은 물질의 농도와 흡수도 사이의 관계를 설명하여 다양한 분야에서 활용되는 중요한 법칙이다.

즉, 입사광의 강도와 투과광 강도의 비율대수는 물질의 농도가 일정할 때 빛은 통과하는 매질의 두께에 비례하며(Lambert 법칙), 매질의 두께가 일정할 때는 매질의 농도에 비례한다(Beer 법칙)는 것이다. 이를 이용하면 빛이 물질에 흡수되는 정도를 측정함으로써 물질의 농도를 구할 수 있다[8]. NASA는 적외선분광법을 화성 생명체 탐사에 이용하였다. 이는 메탄가스를 감지하는 기술로서 화성에서 박테리아가 발산하는 메탄가스가 감지 되면 생명체가 존재했다는 증거이기 때문이다[9].

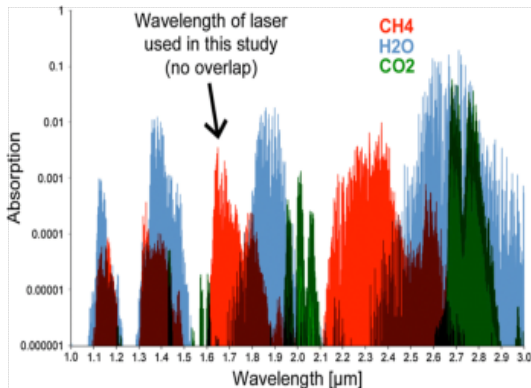


Fig. 2. Wavelength of laser absorption.



Fig. 3. An artist's rendering of the methane gas detector at work on Mars. (NASA/JPL-Caltech).

본 논문에서 제안하는 메탄 누출 가스 검지 기법은 적외선분광법의 일종인 흡수 분광분석법을 이용한다. 메탄 존재 시 특정 파장(1,654nm)을 가진 광원의 세기(Intensity)가 감소하는 데 감소량을 이용하여 가스의 농도를 측정하는 시스템이다. Fig. 4와 같이 단적외선 레이저 광원을 이용하여 검지 대상의 위치에 레이저 광원을 방사하여 되돌아오는 반사파의 세기를 이용하여 가스의 농도를 측정한다. 레이저광이 누출된 메탄 가스 층을 통과할 때 일부는 메탄에 흡수되고 일부는 콘크리트나, 벽 등에 반사되어 메탄 검지 장치로 되돌아온다[10]. 이를 전기적인 신호로 변환하여 ppm-m 단위로 표시한다.

III. 시스템 구성 및 실험 결과

3.1. 메탄 누출 검지 시스템 구성

본 시스템은 CPU 및 Digital 신호처리를 위한 Xilinx FPGA를 기준으로 하여 LD 제어 블록을 이용하여 광원인 LD 센서를 제어하여 원하는 Sine 파를 발진하게 하며, PD Sensor를 통하여 밀리 볼트 단위의

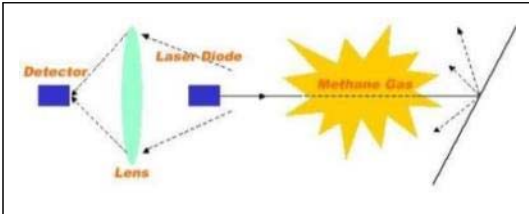


Fig. 4. Schematic diagram of absorption and refraction of a laser beam reflected from a contact object.

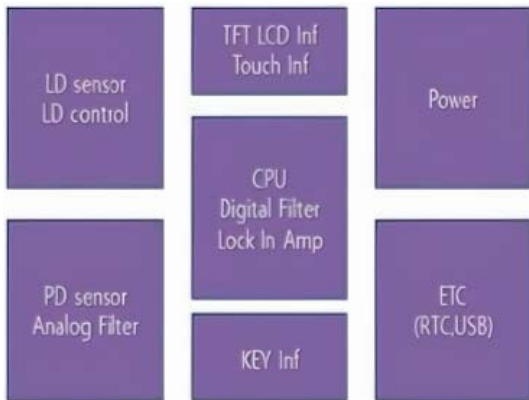


Fig. 5. System Block Diagram.

산란광을 받아서 FPGA에서 마이크로 단위의 광량 변화를 측정하는 Lock In Amp를 이용하여 미세한 가스를 측정하고 Display 하도록 구현한다. 추가적인 기능을 위하여 TFT LCD 인터페이스 및 터치스크린을 장착하며, RTC, USB 인터페이스 및 Key Input 인터페이스를 구현한다.

위에서 제안한 흡수 분광분석법을 이용하여 피 측정치와 비접촉 방식으로 메탄 가스누출을 검지할 수 있는 시스템을 개발하였다.

검지 시스템의 핵심부인 광학계는 메탄가스 파장대인 1,654nm 영역의 적외선 센서 소자를 응용하여 구성하였다. 적외선 센서는 발광 센서와 수광 센서 부분으로 나누어지는데, 발광 센서는 적외선을 방출하고 수광 센서는 적외선을 감지하는 역할을 한다. 발광센서로는 센서에 걸리는 전압과 센서의 극성이 일치할 때만 적외선이 방출되는 레이저 다이오드(Laser Diode)를 이용한다. 수광 센서는 받아들인 적외선의 양에 따라 전류의 양이 변하는 원리를 이용하여 빛의 수신 강도를 파악한다. 측정하고자 하는 메탄가스의 흡수 파장대의 출력 특성을 분석하고, 분석 신호를 회로 변환하여 누출 검지를 알람 및 Bar Graph로 출력하여 시·청각적으로 누출 상황을 신속히 파악하도록 시스템을 구성하였다 [11]. 아래 Fig. 6은 개발한 메탄 누출 검지 시스템을 보여준다.



Fig. 6. Developed Detector.

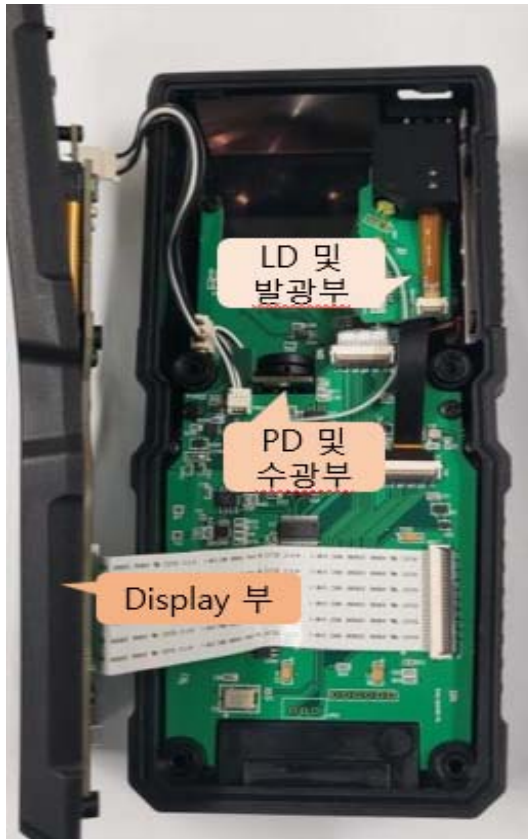


Fig. 7. Configuration of laser methane detector.

Table 2. Measured concentration based on distance

Concentration \ Distance	5m	10m	20m	30m
400ppm	400	360	350	320
1,000ppm	1,000	970	800	700

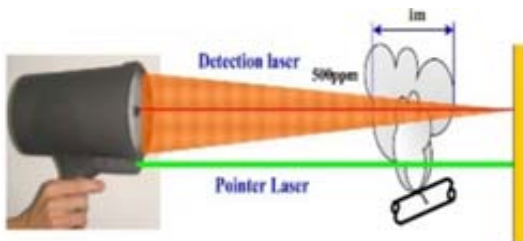
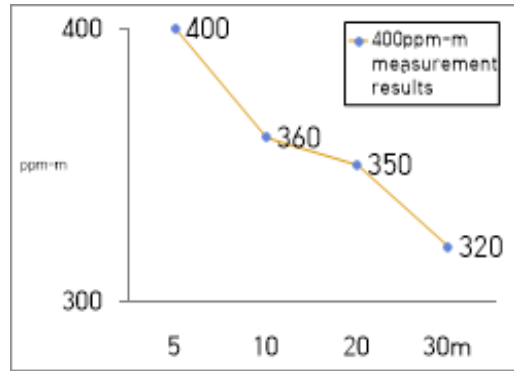
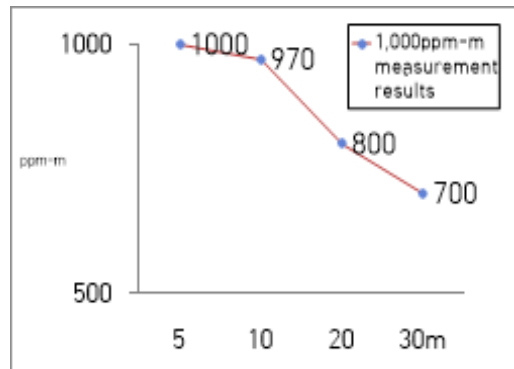


Fig. 8. Gas concentration measurement method.



(a) 400ppm-m Gas measurement results



(b) 1,000ppm-m Gas measurement results

Fig. 9. Methane leak detection performance measurement results using a gas measurement kit.

3.2. 실험 결과 및 분석

실험 및 측정을 위하여 400ppm-m(4cm × 10,000ppm) 과 1,000ppm-m(10cm × 10,000ppm) 가스 측정 kit을 제작하였다. 가스포집 백을 이용하여 거리에 따른 메탄 누출 감지 성능을 측정된 결과 데이터는 Table. 2와 같으며, Fig. 9는 측정 결과를 도식화한 것이다.

본 측정 결과를 통하여 1,654nm 단적외선을 이용하여 원거리에서 메탄을 감지하는 것을 확인할 수 있었다, 특징으로는 근거리에서는 측정값의 차이가 거의 없었으나 거리가 증가함에 따라 감지 농도와 실제 농도의 차이가 측정되었으며, 30m 지점에서는 20~30%의 농도 차이를 나타내었다. 본 측정 장비는 정량적 감사를 위한 장비로서 30m까지의 가스누출을 감지할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

천연가스는 사용하기 편리하고 청정에너지이지

만 누출 사고가 일어날 경우 막대한 인명 및 경제적 피해를 초래할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 피해를 예방하고 안전을 도모하기 위한 효과적인 메탄 누출 가스 검지 시스템을 개발하였다.

개발한 레이저 기반 메탄 누출 가스 검지기는 사각 지역 및 접근성이 어려운 지역의 메탄 시설물의 누출 측정을 위하여 단적외선 레이저 다이오드를 이용하였다.

개발한 기술은 레이저 기반 흡수 분광분석법의 원리를 적용하여 최대 거리 30m에서 누출되는 메탄 농도를 검출할 수 있는 원거리 휴대용 메탄 누출 가스 검지 시스템이다. 향후 저농도 검지, 광안정화 기술, 검지 거리 증가 기술 개발 등을 통하여 메탄 누출 검지 시스템의 성능을 향상하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제입니다.

REFERENCES

- [1] <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=91332>
- [2] <http://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=203253>
- [3] Nam, T.H., Park, G.T., Lyu, G.J., Lee, Y.J., "A study on design and response characteristics of the portable ammonia detector," in *Proc. KIGAS Spring Conference*, 89, (2015)
- [4] Chung, Y.T., *Recent Trends in Infrared Sensors*, Hongreung Science Publishing House, 3, (2014)
- [5] https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-CH4-H2O-and-CO2-laser-wavelength-absorption-45-at-3C-Areas-of_fig11_331160016
- [6] <http://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=preppers&logNo=40109564280>
- [7] Dean Calloway, Beer-Lambert Law", *Journal of Chemical Education*, 74(7), 744,(1997)
- [8] Lee, S.Y., "An exploration on the fabrication of ultraviolet discolouration solution using superfine snow and photocatalytic TiO₂", (2016)
- [9] <https://www.kqed.org/science/22164/pge-tests-tech-adapted-from-nasas-mars-rover-nasa>
- [10] Park, G.T., Lyu, G.J., Kwon, J.R., "Development of Methane Gas Leak Detector Using Mid-infrared Ray Sensors with 3.2 μm ", *Journal of The Korean Institute of Gas*, 12(2), 48-52, (2008)
- [11] Jo, K.H., Lyu, G.J., Kim, E.S., "Small Methane Detection System using Optical Spectrum Characteristics", *Journal of Sensor Science and Technology*, 20(1), 53-57, (2011)