

분광특성을 이용한 소형의 메탄 가스 감지 시스템

조경화 · 류근준² · 김응수^{1,*}

Small Methane Detection System using Optical Spectrum Characteristics

Kyung Hwa Jo¹, Geun Jun Lyu², and Eung Soo Kim^{1,*}

Abstract

We developed a small methane detection system because methane gas is used in many areas and is dangerous. The developed system consisted of LD(Laser Diode) tuned a wavelength of 1.65 μm , two mirrors to collect a laser beam, photo detector. It could detect methane gas at a long range and its sensitivity was 1.98 V/CH₄ %.

Keywords : Methane, Laser Diode, Mirror, Photo Diode, Sensitivity

1. 서론

현재 가정용, 산업용 원료로 사용되고 있는 것은 석탄, 석유, 천연가스 등이 있다. 그 중 천연가스는 석유나 석탄에 비해 가격이 저렴하고 깨끗하며, 사용이 편리하여 가정용, 자동차연료, 난방, 산업계 등에 다양하게 이용되고 있다. 그래서 가스 사용량은 2003년에 66.5%이고 2008년에는 73%로 매년 증가하고 있다[1].

천연가스의 주성분은 메탄이며, 평균 2 ppm의 농도로 대기 중에 존재하는 것으로 나타나고 있지만, 대기 중의 농도가 5% 이상되면 폭발성을 가지게 된다. 그래서 만약 가정에서 사용중인 메탄가스가 누출된다면 인명피해 및 재산피해가 발생할 수 있다. 가스 사고 중 가스 누출로 인한 사고가 2007년에는 전체 가스 사고의 51.3%를 차지하고 있으며, 2009년에는 69%를 차지하고 있어 정확하고 신속한 가스 누출 감지 기술이 요구되어진다[2]. 하지만 메탄 가스는 무색·무취로 누출이 되었더라도 감지하기가 쉽지 않다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 가스 검출방법은 정전위 전해방식, 반도체법[3,4], 접촉식 가스 검출법[5,6], 적외선 흡수법이 있다[7], 그 중 정전위 전해방식과 반도체법은 유지 보수가 어렵고 고비용의 단점이 있다. 또한 접촉식 가스 검출법은 가스 파이프라인 근처에 사람이 가야하는 위험성을 가진 단점이 있다. 따라서 현재 많이 사용되고 있는 메탄 가스의 누출로 인한 사고를 미연에 방지하기 위해 가스라인에서 발생할 수 있는 가스 누출을 시간적·공간적 제약 없이 장거리에서 검출할 수 있는 비접촉식 방법이 필요하다. 따라서 가스의 고유 흡수 파장 영역을 이용한 비접촉식 광 계측법을 이용하여 가스를 검출하는 다양한 방법들이 연구되고 있다.[8,9]

본 연구에서는 메탄의 흡수 파장 영역 중 광원이 소형이고, 공기 내 흡수영역을 가지지 않는 1650 nm의 LD(Laser Diode)를 이용하여 원거리에서도 측정이 가능한 소형 메탄 감지 시스템을 개발하였다.

2. 이론

2.1 메탄의 분광학적 특성

메탄의 분자 구조는 Fig. 1과 같이 1개의 탄소원자를 중심으로 4개의 수소가 결합되어 있는 정사면체 형태이다. 중심원자인 탄소와 결합한 두 수소원자 사이의 결합각들은 109.5°이다. 메탄 분자를 형성하는 원자들은 총 8개의 전자를 가지고 있으며, 4개의 연결궤도를 가진다. 이와 같은 연결에 의한 전이에 반응하는 흡수 파장은 적외선 영역에서 나타나게 된다.

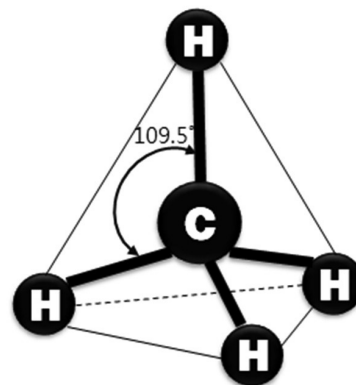


Fig. 1. Molecular structure of CH₄.

대기 중에 누출된 메탄의 농도를 측정하기 위해서는 메탄 흡수 스펙트럼을 알아야한다[10]. 메탄 분자는 적외선 영역에서

¹부산외국어대학교(Pusan Univ. of Foreign Studies),

²한국가스안전공사(Institute of Gas Safety R&D)

*Corresponding author : eskim@pufs.ac.kr

(Received : Sep. 14, 2010, Revised : Dec. 6, 2010, Jan. 17, 2011,

Accepted : Jan. 19, 2011)

1650 nm, 2300 nm, 3310 nm, 7660 nm 4종류의 흡수선을 가지며, 선폭이 매우 좁아 분광특성을 이용하면 다른 물질이 많이 있더라도 메탄만을 검출할 수 있는 장점이 있다. 이들 흡수 파장대역 중에서 3310 nm와 7660 nm의 파장에서 강한 흡수특성을 가지지만, 이 파장의 Laser는 크기가 크고, 고가이며, 대기 중의 수증기의 흡수대역내에 있어 메탄 검출용으로 사용이 곤란하다. 따라서 흡수 강도는 약하지만 광원으로 소형의 LD(Laser Diode)가 존재하고, 대기 중의 수증기의 영향이 작은 1650 nm의 LD(Laser Diode)를 이용하였다.

2.2 적외선 흡수 분광법

가스를 검지하는 방법에는 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 적외선 분광법을 사용 하였다. 적외선 흡수 분광법은 기체 상태의 여러 시료들을 정량적으로 분석하는데 매우 효과적이다. 흡수 분광학의 기본 이론은 Fig. 2의 Beer-Lambert Law 으로부터 설명될 수 있다.

균일한 매질에 레이저 빔이 통과할 때 가스 매질을 통과하여 투과된 광 신호와 입사된 Laser 신호의 강도비로서 나타내지며, Beer-Lambert 방정식은 식(1)과 같다.

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right) = \epsilon lc \tag{1}$$

여기서 I_0 는 입사광 강도이며, I_t 는 투과광 강도를 의미하며, ϵ 는 흡광계수를 나타내며, l 은 Laser 광이 지나가는 측정 대상의 길이를 의미하며, c 는 시료의 농도를 나타낸다.

전체 흡수 파장에 대해서 가장 좁은 선폭을 가지는 파장의 광원을 이용하여 측정하고자 하는 대상이 있는 영역으로 흡수 파장대역에 해당하는 빛 에너지를 조사시키면, 영역 내에 존재하는 검출 대상의 가스는 농도에 비례하여 흡수 파장대역인 광 에너지만을 흡수하고 흡수대역 이외의 파장을 가진 광은 흡수되지 않고 투과되어 나온다. 이렇게 투과되어 나온 광 중에서 흡수대역에 있는 광 에너지를 수신단에서 측정한다. 그러므로 초기 강도 I_0 , 흡광계수 ϵ 와 거리 l 을 알고 있다면, 수신단 검출기에 수신된 I_t 를 사용하여 가스 농도를 정량적으로 계산할 수 있다.

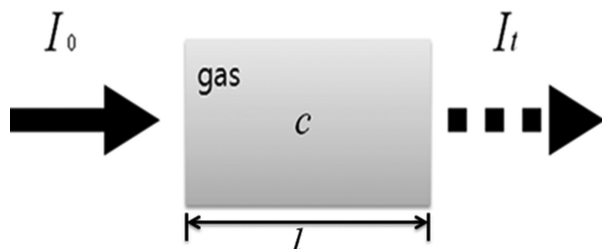


Fig. 2. Beer-Lambert Law.

3. 가스 감지 시스템

3.1 광원과 수광소자

광 흡수법을 이용하여 물질을 감지하기 위해서는 측정하고자 하는 대상 물질의 분광학적 성질에 따른 고유한 흡수 파장에 부합하는 광원을 선정할 필요가 있다.

본 연구에서는 소형의 메탄 검출 시스템을 개발하고자 하므로 메탄 흡수대역인 1650 nm의 파장을 갖고, 크기도 작은 광원을 사용해야 하므로 InGaAs DFB(distributed feedback) Laser를 사용하여 메탄가스 검출 시스템을 제작하였다.

본 연구에 사용한 LD(Laser Diode)는 중심파장이 1625~1670 nm영역에서 발진 가능한 DFB Laser Diode로써 레이저의 grating 주기를 조절하여 특정 파장의 광을 방출 시킬 수 있다.

LD(Laser Diode)의 외관은 파이버와 결합한 14 pin butterfly type으로 Table 1은 구동 전류에 따른 발광 특성을 나타낸 것으로, 측정에서는 파워가 약하면 반사되어 돌아오는 광을 수광하기 어렵고, 메탄의 흡수대역의 파장을 발진하여야 하므로, 100 mA의 입력전류에서 1654 nm의 파장으로 발진된 특성을 이용하였으며, 이때의 power는 약 10 mW 이다.

Table 1. Laser Diode lasing characteristics according to the input current

전류 [mA]	파장 [nm]
30	1653.46
60	1653.62
80	1653.76
100	1653.92

수광소자는 광을 검출하는 소자로 LD(Laser Diode)와 같이 사용된 재료에 따라 수광 특성이 다르며, 광 감도 특성은 사용 재료, 구조에 따라 조금씩 달라질 수 있다. 그러므로 수광 소자도 사용하는 광원에 따라 적절하게 선택 되어져야 한다.

수광 소자인 광 다이오드에서는 신호 대 잡음비, 대역폭, 수광 효율, 암전류 그리고 응답속도 등이 소자의 특성을 결정하는 주요 소이며, 일반적으로 PIN PD(Photo Diode)와 APD(Avalanche Photo Diode)가 이용되고 있다. APD는 감도는 좋지만 가격이 비싼 단점이 있으므로, 광 검출기에 많이 사용되며 가격도 저렴하고 감도가 좋은 InGaAs PIN Photo Diode를 수신기로 사용하였다.

3.2 광 검출 수신회로

소형의 메탄 감지 시스템의 수신부는 반사되어 돌아오는 신호가 미약하므로 Lock-in Amplifier(LIA)를 사용하였다.

Lock-in amplifier는 잡음에 묻힌 원 신호를 추출하기 위하여 미약한 특정 주파수 성분을 검출하는 장치로 측정 신호에 대하여 안정적인 DC 출력 신호를 제공한다[11].

본 연구에서 제작한 Lock-in Amplifier는 추출하고자 하는 신호의 입력을 증폭 및 필터링 하는 AC(Alternating current) Signal channel과 Optical Chopper를 이용하여 생성한 기준 신호를 처리하는 Reference channel, 그리고 연산을 수행 하는 Phase Sensitive Detector로 구성되어 있다.

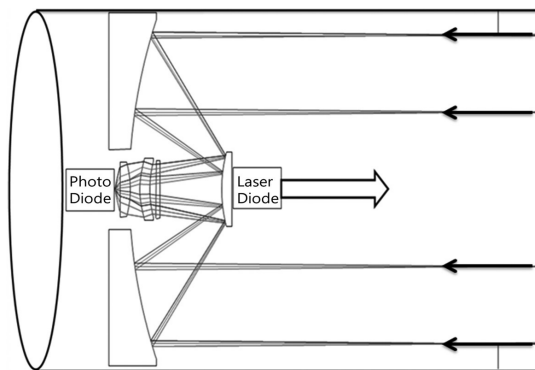
또한 Signal channel 신호에 대해 10배, 100배, 1000배로 증폭도를 조절할 수 있는 기능과 주파수 응답 시간을 고려할 수 있게 시정수를 0.01 s, 0.1 s로 조절할 수 있어 보다 감도 좋은 신호를 얻을 수 있도록 하였다.

따라서 광 수신 회로는 광 검출기에서 받은 미약한 신호를 몇 단에서 처리 가능한 크기의 신호로 증폭 시키고, 잡음이 섞인 증폭된 신호에서 기준신호를 통해 원 신호만을 추출 할 수 있다.

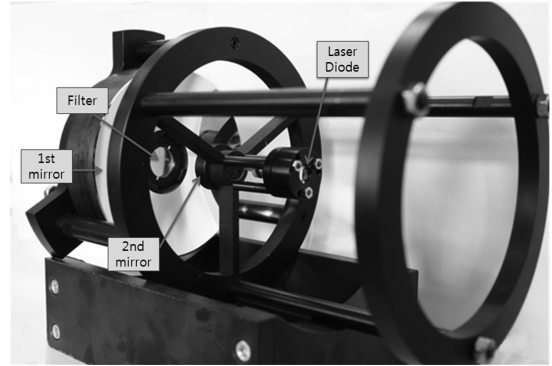
3.3 감지 시스템 구조

시스템의 구성도는 Fig. 3과 같으며, 크기는 외경이 16 cm, 길이가 26 cm이다[12]. 시스템 각각의 모듈은 지지대에 고정되어 있으며 LD(Laser Diode)는 중앙에 위치하여 Laser 광을 검출 대상가스가 있는 영역으로 조사한다. 시스템의 PD(Photo Diode)가 있는 부분에 1차 반사경이 있고, 2차 반사경은 LD(Laser Diode) 뒤쪽에 위치하고 있으며, PD(Photo Diode) 앞에 밴드 패스 협대역 필터가 있어 노이즈로 작용할 수 있는 광은 차단하고 가스 감지에 이용되는 Laser 광만 통과 되도록 하였다.

LD(Laser Diode)로부터 광이 메탄 가스가 있는 영역으로 조사되어지고, 메탄이 있는 영역에서 Laser광의 일부가 흡수되고, 반사되어 오는 반사광이 오목거울 형태의 1차 반사경에서 반사되어 2차 반사경으로 가고, 볼록거울 형태인 2차 반사경에서 반사된 광이 렌즈와 밴드 패스 협대역 필터를 통해 메탄 가스 감지에 사용되는 파장만 통과시켜 수광 소자에 입사된다.



(a) Schematic of detection system



(b) The fabricated detection system

Fig. 3. Gas detection system

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 메탄 감지 시스템을 이용한 가스 측정 개략도는 Fig. 4와 같다. 여기서 L은 감지 시스템에서 가스 샘플을 통과한 광의 진행 거리 즉, 가스 감지 시스템에서부터의 측정 거리이다.

광원은 메탄 흡수파장인 1650 nm의 광을 발진시키는 InGaAs Laser Diode를 사용하였다. 메탄에 조사되는 광원의 power가 약하면 검출이 어려우므로 Laser의 구동 전류를 조절하여 power를 조절하였다.

렌즈를 포함한 광원 모듈에서 조사한 광을 Optical chopper를 이용하여 10 kHz로 변조시켜 메탄 Gas cell을 향해 조사시키면 광의 일부는 흡수되고 남은 광은 반사되어 되돌아오는 광은 시스템 내의 반사경과 필터·렌즈를 통하여 PD(Photo Diode)로 들어가게 된다.

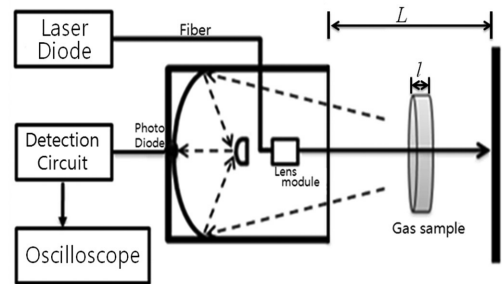


Fig. 4. System configuration for detecting methane gas.

메탄 가스를 통과 후 검출한 신호는 미약하고 노이즈가 많아 Lock-in amplifier를 통해 증폭 및 필터링 되고, 최대의 감도를 얻기 위해 증폭된 신호와 기준 신호와 연산과정을 거친 후 DC 전압의 신호로 출력 신호를 얻어 원거리에서의 미량의 메탄을 감지하였다. 제작된 광학계를 이용하여 일정거리에서 메탄가스를

의 표준샘플을 두고 실험을 하였다.

가스 표준 샘플은 가스 안전공사에서 제공받은 1.18 %, 2.25 %, 3.45 % 3종류를 사용하였다.

Fig. 5는 동일한 거리 조건에서 Laser의 구동전류에 따른 측정 결과이다. 구동전류가 높을수록 광의 power가 높아 수광되는 신호값이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 광의 power가 약 10 mW가 되도록 구동전류를 100 mA로 조절하여 측정하였다.

각 표준 샘플을 사용하여 수광 소자에 검출된 반사광의 신호를 측정된 결과 메탄가스 농도가 짙어짐에 따라 신호가 감소되는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 광원에서 가스 샘플까지 거리를 변경하면서 측정된 결과로 거리가 1.5 m로 가까울 경우는 빔경이 작아 반사광의 강도가 강하여 신호가 컸지만, 거리가 멀어짐에 따라 빔경이 커져 반사광의 강도가 약하게 되어 신호가 작아짐을 확인하였다. 또한 농도가 짙어질수록 수광 되는 양이 감소됨을 확인하였다.

거리가 1.5 m에서의 빔경은 약 2 cm로 가스를 검출했을 때 신호의 감도는 1.98 V/%로 가장 좋은 감도를 나타내었다. 7 m 거리에서는 약 13 cm로 빔경이 커져 반사되어 돌아오는 신호가 약해 감도가 떨어졌지만 선형성을 유지하고 있어 본 연구에서 제작한 가스 감지 회로를 이용하여 메탄 가스 농도를 검출할 수 있음을 확인하였으며, 실제 시스템에는 가시광선 영역의 기준 레이저를 추가시켜 기준 레이저의 수광 신호로 거리와 반사면의 거칠기에 따른 환경적 요인에 대한 영향을 보상 시키는 방법을 사용하여 환경적 요인으로 인한 신호값의 감소는 가스 농도 검출에 영향을 미치지 않는다.

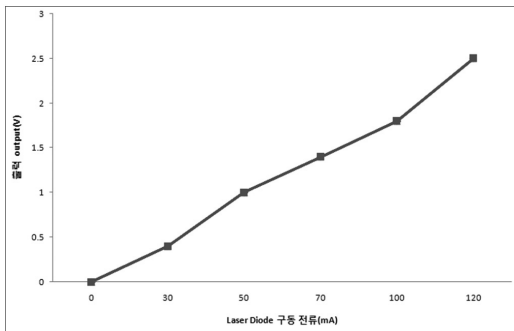


Fig. 5. According to Laser Diode driving current the output signal.

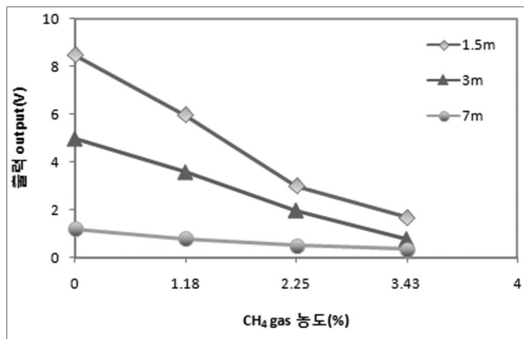


Fig. 6. Output signal VS CH4 gas concentration.

5. 결론

본 연구에서는 LD(Laser Diode)를 이용하여 소형의 가스 감지 시스템을 설계 제작하였다.

LD(Laser Diode)를 이용함으로써 소비 전력이 적고, 소형화를 할 수 있었으며, 비접촉식 광 계측법으로 원거리에서도 측정이 가능하며, 신속한 측정이 가능하며, 또한 전기적 스파크에 의한 화재 위험성도 없는 장점이 있다.

본 연구에서 제작한 시스템으로 측정된 결과 메탄 가스 농도에 대한 감도는 1.98 V/CH₄ %로 나타났으며, 가스 산업 현장에서 안전관리가 요구되는 다양한 가스의 감지에도 적용 가능할 것이다.

감사의 글

광학계 설계 제작을 위해 도움을 준 (주) 토핀스의 김현규 사장, 옥천영 연구원, (주)선두전자의 이동화 소장께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Korea energy economics institute, "Yearbook of regional energy statistics 2009", pp. 27-50, 2008.
- [2] Korea gas safety corporation, "2009 Gas accident yearbook", 2010.
- [3] Chang Yong Jo, Ki Cheol Park, and Jeong Gyoo Kim, "Gas sensing characteristics of Co₃O₄ thick films with metal oxides", *J. of the Korean Sensors Society*, vol. 18, no. 1, pp. 54-62, 2009.
- [4] Kwang Hee Kim, Jeong Gyoo Kim, and Ki cheol Park, "The CO sensing properties of thick film gas sensor using Co₃O₄ powders prepared by hydrothermal reaction method", *J. of the Korean Sensors Society*, vol. 19, no. 5, pp. 385-390, 2010.
- [5] Dae Ung Hong, Chi Hwan Han, Sang Do Han, Jihye Gwak, and Sang Yeol Lee, "Catalytic combustion type hydrogen gas sensor using TiO₂ and UV LED", *J. of the Korean Sensors Society*, vol 16, no. 1, pp. 7-10, 2007.
- [6] Chan-Woo Kim, Jihye Gwak, Il-Su Chun, Sang-Do Han, and Sie-Young Choi, "Improved hydrogen sensing characteristics of flat type catalytic combustible hydrogen gas sensor of micro-structure", *J. of the Korean Sensors Society*, vol. 18, no. 3, pp. 202-206, 2009.
- [7] Ministry of Science and Technology, "Detection of natural gas detection using laser", 2004.
- [8] Jong Hyuk Park, Yong il Jun, and Yu Kyung Lee, "IT

convergence technology based gas sensor technology for environmental monitoring”, *J. of the Korea Communications Society*, vol. 25, no. 6, pp. 40-47, 2008.

[9] Yutaka Matsumi, Fumikazu Taketani, Kenshi Takahashi, Tomoki Nakayama, Megumi Kawai, and Yuka Miyao, “Fluorescence detection of atmospheric nitrogen dioxide using a blue light-emitting diode as an excitation source”, *Appl. Opt.*, vol. 49, no. 1, pp. 3762-3767, 2010.

[10] Angus Henderson, “Mid-IR tunable lasers probe

hydrocarbon molecules”, *Photonics spectra*, vol. 43, Issue 9, pp. 72-75, 2009.

[11] “About lock-in amplifier”, *Application Note*, Stanford reserch systems, Sunnyvla, CA, 1999.

[12] GeunJun Lyu, GyuTae Park, JangSik Park, JeongRock Kwon, DongHwa Lee, ChangMin Ok, HyeonGyu Kim, and EungSu Kim, “Design of methane gas detector by using laser optic systems”, *Proceedings of '08 KIGAS Autumn conference*, pp. 95-99, Chungju, Korea, 2008.



조 경 화(Kyung Hwa Jo)

- 2008년 부산외국어대학교 디지털미디어 학부(공학사)
- 2010년 부산외국어대학교 전자컴퓨터공학과(공학석사)
- 주관심분야 : 광센서



류 근 준(Geun Jun Lyu)

- 1990년 국민대학교 금속공학과(공학사)
- 1992년 국민대학교 금속공학과(공학석사)
- 2002년 국민대학교 금속재료공학과(공학박사)
- 1992년~현재 한국가스안전공사 가스안전연구원 책임연구원



김 응 수(Eung Soo Kim)

- 1990년 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1992년 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 일본 게이오 대학원 물질과학과 (공학박사)
- 1996년~1997년 LG 반도체 주식회사 ULSI 연구소 선임 연구원
- 2003년 일본 게이오 대학 초빙교수
- 1997년~현재 부산외국어대학교 디지털 미디어학부 부교수
- 주관심분야 : 광센서, 비선형광학, 광집적회로