

중적외선 광센서 기술동향

Technological Trend of Mid-infrared Optical Sensors

최신 반도체, 하드웨어 기술
동향 특집

- I. 서론
- II. 본론
- III. 결론

임영안 (Y.A. Leem, leem@etri.re.kr)

광융합부품연구그룹 책임연구원

권오기 (O.K. Kwon, okkwon@etri.re.kr)

광융합부품연구그룹 책임연구원

김기수 (K. Kim, kimks1136@etri.re.kr)

광융합부품연구그룹 책임연구원/그룹장

Mid-infrared optical sensors have a number of compelling advantages for remote sensing and the simultaneous measurement of mixtures. However, they still have difficulties in accurate detection owing to signal interferences among a large number of molecular fingerprints in the mid-infrared band, which result in very slow commercialization. Higher sensitivity and higher selectivity are required to overcome this obstruction in measurement technology. In this paper, we review and analyze the trends of mid-infrared sensor technologies enhancing the sensitivity and selectivity.

* DOI: 10.22648/ETRI.2018.J.330605



본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

1. 서론

분자의 에너지는 분자구조에 따른 전자의 에너지 준위 $E_{\text{전자}}$, 분자의 진동운동에 의한 에너지 준위 $E_{\text{진동}}$, 분자의 회전운동에 의한 에너지 준위 $E_{\text{회전}}$ 로 나누어진다.

$$E_{\text{분자}} = E_{\text{전자}} + E_{\text{진동}} + E_{\text{회전}} \quad (1)$$

2원자 분자인 경우 $E_{\text{진동}} = hv(n + \frac{1}{2})$ 로 간략히 표현되며, 이러한 진동이 쌍극자 모멘트를 발생시킬 때 빛과 상호작용을 하여 흡수 또는 방출을 하게 된다. N 개의 원자로 이루어진 분자의 경우, $3N - 5$ 개의 진동모드를 가지는데, 대부분의 분자들은 선택조건 $\Delta n = 1$ 을 만족하는 기본모드가 중적외선 파장대역(3~30 μm)에 존재한다. 기본모드 에너지는 물질마다 고유한 값으로 분자의 흡수스펙트럼 측정을 통해 분자의 성분을 분석할 수 있다.

이러한 물질 분석 기능은 다양한 응용성을 가져 많은 관심을 받았으나, 중적외선 연구에 필요한 소재 및 부품들의 부재로 연구개발이 제약적이었다. 열화상카메라의 필요성으로 중적외선 검출기는 일찍 상용화에 성공하였으나, 광원은 1994년에 이르러 양자폭포레이저가 제안되었다. 이후 양자폭포레이저의 비약적인 발전과 소재 및 부품들의 개발로 중적외선 기반의 센서에 대한 연구가 비약적으로 증가하였다.

그러나, 그동안 많은 연구성과에도 불구하고, 중적외선 기반의 광센서의 상용화는 아직 요원한 상태이며, 그 주요원인은 센서에서 요구되는 감도(sensitivity)와 선택성(selectivity)를 만족시키지 못하기 때문이다.

높은 감도를 가지기 위해서는 높은 흡수율, 긴 광경로가 필요하다. 광흡수에 따른 광세기는 식(2)의 Lambert-Beer의 법칙을 따른다.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)\exp[-\alpha L],$$

$$\alpha L = \frac{I_0 - I}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0} \quad (\alpha L \ll 1). \quad (2)$$

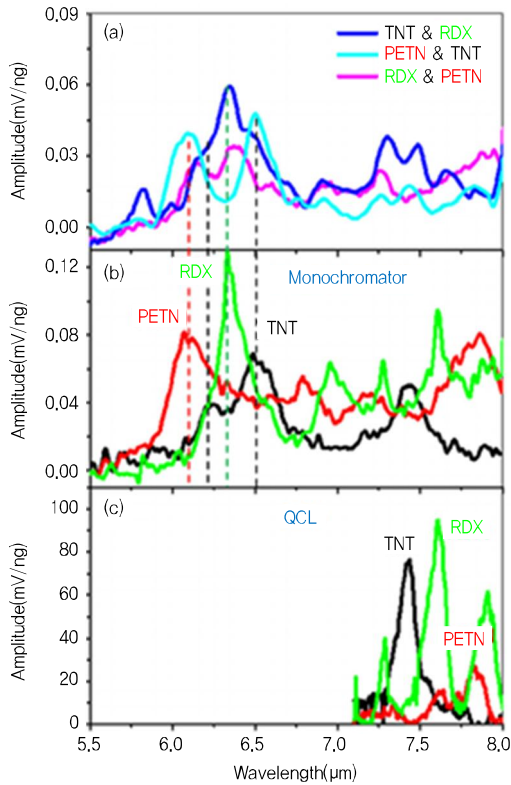
여기서, I 는 흡수강도, λ 는 파장, α 는 흡수율, L 은 광경로를 나타낸다.

중적외선 대역에 분자 진동에너지의 기본모드들이 다른 대역에 비해 높은 흡수율을 가지는데 메탄의 경우 3.2 μm 근처 기본모드의 흡수강도가, 1.6 μm 의 고조파 모드 영역의 흡수보다 1,000배 강하다. 이처럼 다른 대역에 비해 높은 흡수율을 가지고 있지만, ppb이하의 높은 감도를 구현하기 위해서는 긴 광경로가 요구되어 다양한 형태의 다중경로 셀을 사용하고 있다. 그러나, 다중경로 셀의 사용은 소형화를 어렵게 하며, 근본적으로는 시료채집의 문제를 야기하여 광센서의 장점 중 하나인 원격감지의 기능을 상실하게 한다.

이는 높은 선택성과 고감도를 보유하고 있는 MS(Mass Spectrometry), GC(Gas Chromatography), IMS(Ion Mobility Spectrometry)등의 고성능 분석기가 연구개발을 통해 소형시스템으로 상용화된 상황에서 원격 측정의 장점이 사라질 경우 차별성 확보가 어렵다. 근래에 CRDS(Cavity Ring-Down Spectroscopy)와 PAS(Photoacoustic Spectroscopy)와 같은 고감도 분광법에 대한 연구가 진행되어 왔으며, ppb레벨을 넘어서 ppt레벨의 결과가 제시되고 있다[1].

중적외선 대역에는 많은 분자의 지문이 존재하기 때문에 실제 환경에 적용시 신호간섭의 문제가 발생할 수 있다. 중적외선 대역의 분자흡수선은 선폴이 매우 좁아 고분해능 분광을 적용하며 이러한 문제를 해결할 수 있는데, 통상 광원의 파장을 정밀하게 가변시켜 파장별 광흡수를 측정하는 방식과 광대역 광원과 정밀도가 높은 분광기로 측정하는 방식으로 나눌 수 있다.

파장가변 광원을 활용할 경우 현재의 기술로는 빠른 속도로 정밀한 파장가변을 진행할 수 없기 때문에 신호 측정시간의 한계로 넓은 대역폭을 측정하기가 어려우며, 고정밀 분광기의 사용은 소형화에 난점을 가지고 있어 광센서로서의 적용에 한계를 가진다. 근래에 광빔살



(그림 1) 혼합물의 신호간섭(a) TNT, RDX, PETN의 1:1 혼합물의 흡수스펙트럼과 (b) 모노크로미터를 이용한 광원을 사용한 개별물질의 흡수스펙트럼, (c) QCL 파장가변광원을 이용한 개별 흡수스펙트럼

[출처] Reprinted from S. Kim, D. Lee, and T. Thundat, "Photothermal Cantilever De-flection Spectroscopy," *EPJ Tech, Instrum.*, vol. 1, no. 7, 2014, pp. 1-7, CC BY 4.0.

발생기(Optical Comb Generator) 기반의 광대역 고정밀 분광에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나, 광센서에 적용하기 위해서는 소형 광대역 광빔살발생기의 구현이 핵심이나 아직 연구개발 단계이다.

한편, 작은 분자들의 경우는 고정밀 분광으로 물질분석이 가능하나, 고분자물질의 경우 많은 흡수선이 존재하며, 흡수선 간의 간격이 매우 좁기 때문에 분석이 어렵고, 현재 넓은 범위의 흡수스펙트럼을 측정하여 스펙트럼의 형태로 물질을 판별하는 방법을 취하고 있으나, (그림 1)[2]에서 나타난 바와 같이 2개의 혼합물에 의해서도 흡수스펙트럼이 크게 변화하며, 존재하는 물질의

수가 많아질수록 구성하는 물질의 종류를 판별하기 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy), Raman 분광, PTS(Photothermal Spectroscopy)등 다양한 방법들이 연구되고 있다.

중적외선 대역은 상술한 문제와 함께, 실환경에 존재하는 다양한 열원에서 방출되는 중적외선에 기인한 잡음으로 인하여 실제 적용을 더욱 어렵게 하며, 잡음을 제거하기 위한 신호처리의 중요성이 부각되고 있다.

본 글에서는 제기한 문제들을 해결하기 위한 기술과 적용 사례를 소개하고자 한다.

II. 본론

1. 광센서의 위치와 과제: 가스센서

현재 상용화된 소형 가스센서는 반도체식, 전기화학식, 접촉연소식, NDIR(Nondispersive Infrared)센서가 있으며, 최소 측정농도는 1ppm 정도이다[3]. 여기서, 기술적인 이슈는 감도와 선택성으로 이를 향상시키기 위한 다양한 연구가 진행 중이다.

NDIR 센서는 가스센서시장 중 대략 20%대의 시장점유율을 가지며, 저가형의 광원과 필터를 통해 소형가스센서의 표준규격(크기)을 맞추고 있다. 다양한 물질에 대한 검색가능성은 입증되었으나, CO₂와 CH₄ 등 몇 가지 가스에만 현재 적용되고 있으며, 적용확대를 위한 연구가 진행되고 있다.

중적외선 기반 광센서의 성능적인 위치는 상술한 NDIR 센서를 포함한 현재 상용화가 되어 있는 센서들과 실험실의 고정밀 물질분석기의 중간정도의 위치가 될 것으로 보인다.

최근 실험실에서 분석장비로 사용되었던, IMS, MS, GC들은 지속적인 연구로 포터블이 가능한 20kg 이하의 소형화에 성공하였으며, 각 장비의 원리를 융합한 형태로 감도 및 선택성을 더욱 확장하고 있다. IMS, MS,

GC는 나노그램(10^{-9} g) 이하의 측정한계와 피코그램(10^{-12} g) 이하의 감도를 보유하고 있으나, 측정 전 복잡한 시료처리과정이 필요하다. 이에 반하여 분광기술은 시료처리과정이 필요하지 않으나, 높은 감도를 가지기 위해서는 분광시스템의 복잡성이 증가하며, IMS, MS, GC만큼은 복잡하지 않지만 시료채취, 필터링, 압력조절 등의 부가적 처리과정이 요구된다. 따라서, 광분광기술은 기존 기술과의 차별성을 유지하기 위해서는 원격측정 및 다양한 물질의 동시측정 등과 같은 광 특유의 장점을 부각함과 동시에 성능면에서도 기존 기술에 버금가는 결과를 보이지 않으면 안된다.

한편, 중적외선 분광기술 중 직접흡수분광(DAS: Direct Absorption Spectroscopy)은 물질의 투과전후의 광세기 변화를 측정하는 방식으로 시스템 구성 자체는 매우 간단하다. 그러나, 실환경에서의 광세기 변동과 가용한 검출기의 한계로 높은 감도의 분광을 구현하기가 어렵기 때문에 고감도 분광법이 필요하다.

2. 고감도 중적외선 분광

고감도 흡수분광을 위해서는 긴 광경로가 필요하고, <표 1>에서 보듯이 다양한 형태의 다중경로 셀(multi-

<표 1> Multipass cell 비교

Multipath cell	광경로 총 길이(m)	반복수	부피 (Liter)
Herriott cell	30	74	1
Astigmatic Herriott cell	36	182	0.3
White cell	7.5	12	10
White cell with recirculations	5,984	272	Not stated
Chernin cell	~1,500	~500	160
Combination cell with three mirrors	140	130	5.4
Twisted cylindrical mirrors	58	49	5.4
Circular multi-reflection cell	1.04	17.5	0.085
Integrating sphere	4.4	65	0.5

[출처] J. Wojtas et al., "Mid-infrared Trace Gas Sensor Technology Based on Intracavity Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy," *Sensors*, vol. 17, no. 3, 2017, pp. 513:1-513:9, CC-BY 4.0.

pass cell)이 개발되어 왔다[4]. 그러나, 다중경로 셀은 긴 광경로를 확보하기 위해서 시스템의 크기가 커지는 문제를 가진다. 여기서 직접적인 분광방법에서의 최소 측정가능 흡수량 MDAL(Minimum Detectable Absorption Limit)은 입력광 세기의 변동(fluctuation) 값으로 볼 수 있어서 측정값이 광원세기와 직접관계되는 한 근본적인 한계를 가지며, 다중경로 셀을 적용한 흡수분광시 10^{-7} cm⁻¹ 정도의 MDAL 값을 가진다.

이처럼 분광법 자체에서 발생하는 한계를 극복하기 위하여 공진기 기반의 흡수분광과 빛의 흡수에 따른 온도변화에 기반한 방법이 연구되어 왔고, 본 절에서는 대표적인 CRDS와 PAS에 대해 소개하겠다.

가. CRDS

(그림 2)[5]에서 보듯이 광이 공진기에 입사되면, 공진기내의 광밀도가 증가하게 되고 공진기내의 흡수도에 따라 감쇄시간이 변화하게 되는데, 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 감쇄시간 측정을 통해 흡수도를 얻게 된다. 여기서 L 은 공진기 길이, R 은 공진기를 구성하는 거울의 반사도, 그리고, α 는 공진기 내 물질의 흡수도이다.

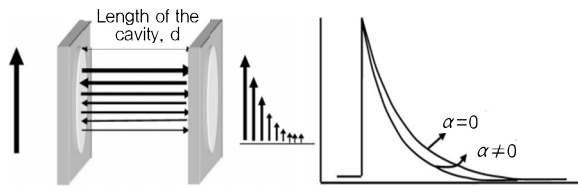
$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

$$\tau = \frac{L}{c[(1-R) + \alpha L]}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_{\text{empty}}} = c\alpha$$

본 구조에서는 측정값이 광원의 세기에 무관하여, 낮은 MDAL을 구현하기가 수월하며 공진기 내에 물질이 존재하는지 없는지의 유무에 따른 감쇄시간 측정을 통해 흡수율이 결정되어 공통잡음이 제거된다.

개발초기에는 광원은 펄스레이저를 사용하였으나, 고분해능 분광을 위하여 CW 레이저를 이용하는 방법이 개발되었고, CRDS에서 사용되는 반사경의 반사율은



(그림 2) CRDS의 개념도(공진기에 광을 입사하여 시간에 따른 광량의 변화를 측정하여 셀내에 존재하는 물질의 흡수를 추출)

[출처] P. Sahay, S.T. Scherrer, and C. Wang, "Measurements of the weak UV Absorptions of Isoprene and Acetone at 261–275nm Using Cavity Ringdown Spectroscopy for Evaluation of a Potential Portable Ringdown Breath Analyzer," *Sensors*, vol.13, no. 7, 2013, pp. 8170–8187, CC BY 3.0.

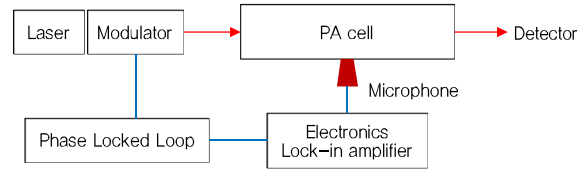
99.9% 이상으로 광경로가 수 km에 달하여, 높은 SNR을 확보할 수 있었다.

2008년 Pradhan은 시료의 사전처리를 통해 CRDS와 GC 분석을 하여 동일한 결과를 얻었음을 보고한 바 있다[6]. 여기서, CRDS 분석에서 C₂H₂의 IR 대역의 흡수선(1,535.393nm)을 측정하였는데, 중적외선 대역을 이용할 경우 더 높은 감도를 가질 것으로 판단된다. 또한, 2017년 같은 연구그룹에서 QCL을 이용하여 CH₄에 대한 CRDS 분석을 하였으며, 최소 측정가능 흡수량은 1.32×10⁻⁸ cm⁻¹, 검출한계(detection limit)는 38.52pptv를 얻었다[7].

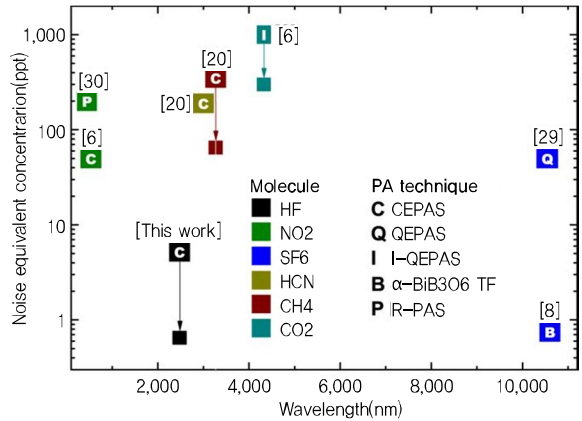
CRDS 측정을 통해 높은 감도의 분광을 구현하였으나, 광정렬, 레이저 파장과 공진기모드의 안정적 동기화, 고속신호처리 등의 단점을 보유하고 있으며, 이러한 문제점을 제거하기 위하여 phase-shift CRDS, ICLAS (intracavity laser absorption spectroscopy), CEAS (cavity enhanced absorption spectroscopy) 등의 다양한 변형된 방법이 제안되어 연구되고 있다[8].

나. PAS

PAS는 열분광의 일종으로 빛의 흡수에 의해 물질의 온도가 주변부의 온도보다 높아져 열팽창이 발생하게 되며, 조사광을 변조시킬 경우, 음향파가 발생하며 주파



(그림 3) 현재 사용되는 PAS의 개략도



(그림 4) PAS의 보고된 NEC결과

[출처] Reprinted from T. Tomberg et al., "Sub-parts-per Trillion Level Sensitivity in Trace Gas Detection by Cantilever-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy," *Scientific Reports*, vol. 8, 2018, pp. 1848:1–1848:7, CC BY 4.0.

수는 변조주파수를 따르며 이 음향파 측정을 통해 물질에 흡수된 광량을 측정하는 방식으로써 (그림 3)이 분광기의 개념적인 구성도를 보여준다.

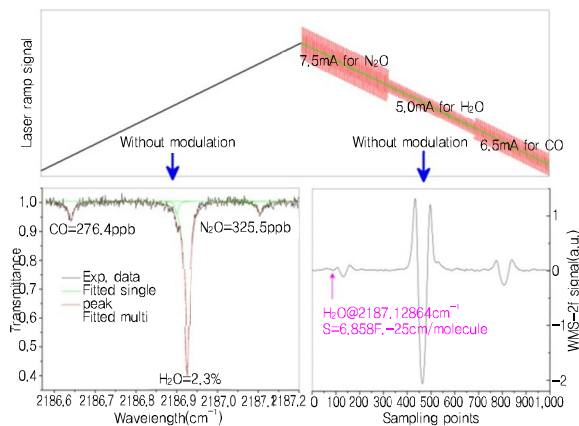
중적외선 분야에서 응용이 가능한 것은 광여기 진동 모드에서 기저모드로 radiative recombination life time 이 매우 길어(0.01~1초) 대부분의 에너지가 운동에너지로 전환되기 때문이다. 실험장치에서 PA 셀의 구성이 중요하며, resonant PA 셀구조가 높은 SNR의 확보에 유리하기 때문에 높은 Q값을 가져야 함과 동시에, 광창 (Optical Window)와 가스입출구에 따른 섭동을 최소화해야 한다. PAS는 CRDS와 마찬가지로 직접흡수방법에서 발생하는 입력광의 세기의 변동에 따른 잡음을 배제할 수 있다.

PAS의 감도는 신호를 수신하는 microphone의 감도와 밀접한 관계를 가지며, 이를 개선하기 위한 방법으로

QEPAS(Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy) 및 CEPAS(Cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy) 등의 방법이 등장하였으며, (그림 4)에서 보듯이 ppt(10^{-12})레벨의 감도를 달성하고 있다[9]. QEPAS는 가스셀에 대한 공명조건 대신에 큰 Q값을 가지는 QTF(quartz tuning fork)을 이용한 방법으로 분광기의 소형화 및 감도에 큰 장점을 가지고 있다. CEPAS는 셀내의 압력의 변화를 cantilever의 변형을 통해 감지하는 방식으로 비공명 조건에서 최적의 방법으로 알려져 있다.

3. 고분해능 중적외선 분광

파장가변레이저 기반의 분광기술인 TLS(Tunable Laser Spectroscopy)는 고분해능 분광의 구성을 간단히 할 수 있다. (그림 5)[10]의 하단의 좌측 그림은 DFB QCL(Distributed Feedback Quantum Cascade Laser)의 인가전류와 동작온도를 변화시켜 발진파장을 미세조절하여 획득한 CO, H₂O, NO₂의 고정밀 흡수스펙트럼으로, 다중경로 셀과 MCT(Mercury Cadmium Telluride) 검출기를 사용하여 200ppb급의 측정결과를 제시하고 있다. 여기서, 0.5cm⁻¹의 좁은 영역에 세 분자의 흡수스펙



(그림 5) DFB QCL 기반의 고정밀 분광

[출처] Reprinted from J. Li et al., "Simultaneous Atmospheric CO, N₂O and H₂O Detection Using a Single Quantum Cascade Laser Sensor Based on Dual Spectroscopy Techniques," *Sens. Actuators B: Chem.*, vol. 231, 2016, pp. 723–732.

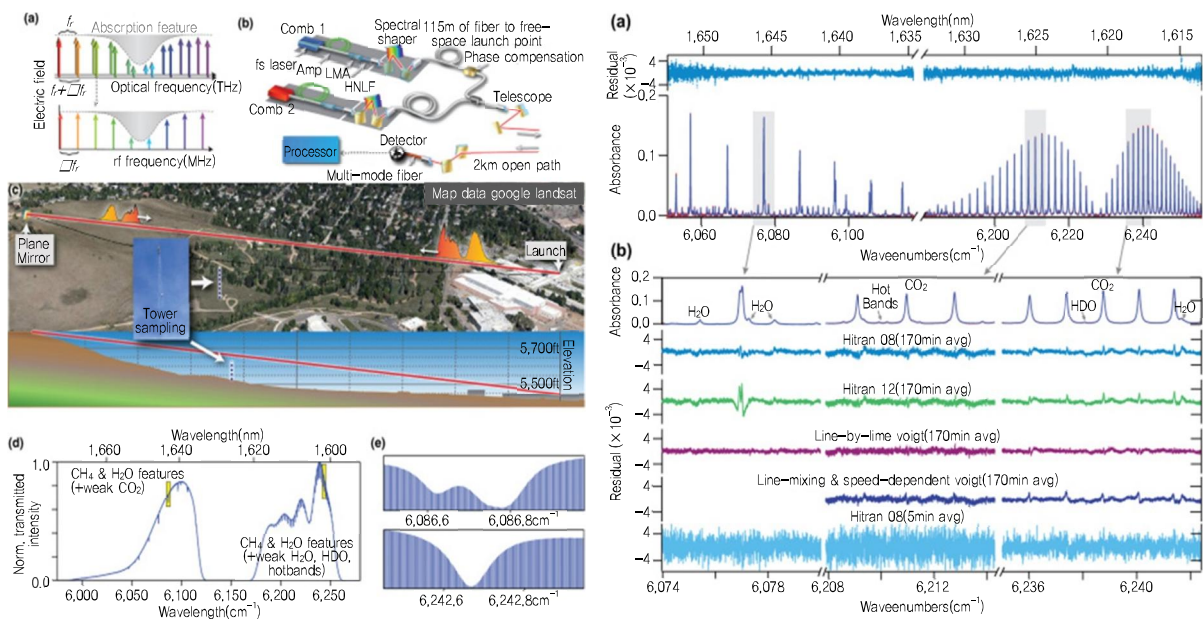
트럼이 존재하며 H₂O와 NO₂ 흡수선의 차이는 0.2cm⁻¹ (~6GHz)에 불과하다. 이와 같은 근접한 신호의 존재는 실환경에 적용시 다른 물질에 의해 많은 신호간섭이 발생할 가능성과 이를 해결하기 위해선 고분해능 분광이 필요함을 보인다.

일반적으로 분광기는 회절격자와 같은 분산매질을 사용하여 구현되지만 고분해능 분광기 구성이 복잡하고 소형화가 불가능하다. 반면에 TLS는 파장의 정밀한 조절을 통해 간단한 구성을 가지지만, 파장가변범위의 제약과 파장안정화 및 모니터링의 문제를 가지고 있다. 참고로 광통신대역에서 사용되는 분광기의 가장 높은 분해능은 0.01nm (~1.2GHz, ~0.04cm⁻¹)이다.

근래에 광빛살발생기 기반의 광대역 고분해능분광에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 한 개의 광빛살발생기를 사용하는 경우는 광대역 광원을 사용하는 경우와 마찬가지로 고정밀 분광기가 필요하지만, 두 개의 광빛살발생기를 사용할 경우 기계적인 광경로 변위를 주지 않고 광대역 고분해능 FTIR(Fourier Transform Infrared) 분광기를 구현할 수 있다. (그림 6)은 1,600~1,670nm 대역의 광빛살발생기를 이용하여 open path 방식으로 측정한 결과이다. 분광정밀도는 0.0033cm⁻¹, 물질 함량 정밀도는 0.1ppm(CO₂)와 2ppb(CH₄)를 보고하고 있다. 측정한 결과는 170분을 누적 평균한 것으로 이러한 데이터 처리가 가능한 것은 광빛살발생기가 가지는 고유의 안정성에 기인한다[11].

이 연구팀의 결과는 광빛살발생기를 사용할 경우 고정밀도와 광대역을 동시에 확보할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그러나, 실제 적용을 위해서는 1,600nm 파장대역 대신에 높은 흡수율을 가지는 중적외선 대역으로 옮기는 것이 바람직하며, 중적외선 대역의 광빛살발생기는 비선형 파장변환방식으로 Menlo system에서 상용화되었으나, 소형시스템을 위해서는 소형 광빛살발생기가 필요하며, 이에 대한 많은 연구가 진행 중이다[12].

이러한 고정밀분광기 기반의 선택성 확보는 고분자물질



(그림 6) 광빗살발생기 기반의 분광(반사경을 사용한 open path 분광법으로 광경로는 ~2km이며, 2개의 광빗살발생기 사용하여 두 광빗살의 간격차를 통해 고정밀 분광 구현)

[출처] Reprinted from G.B. Rieker et al., "Frequency-comb-based remote sensing of greenhouse gases over kilometer air paths," *Optical*, vol. 1, no. 5, 2014, pp. 290-280.

에 대해서는 적용이 불가능하며, 현재 넓은 파장범위를 측정하여 전체 패턴의 형상으로 판단을 하고 있으나, 오판독의 문제가 크며 소량의 물질에 대해서는 판독자체가 불가능하다. 고분자물질에 대해서는 시료를 플라즈마화 하여 분석하는 LIB방식과 Raman 신호에 기반한 기술 등이 존재하며, 이 기술들은 중적외선과 관련성이 없는 부분이어서 존재여부만을 언급한다.

4. 해외 동향

유럽에서는 MIRPHAB(mid infrared photonics devices fabrication for chemical sensing and spectroscopic applications) 프로젝트가 진행 중이며, 이 프로젝트의 목표는 중공업의 제조를 위해 상업적으로 실용적인 파일릿 라인을 만드는 것이다. 이 프로젝트가 지향하는 제품은 분광시스템으로 구성에 필요한 다중경로 셀, PA 셀, 검출기, 수동도파로, 광원의 개발을 진행하고 있으며, 전체적인 방향은 중적외선 대역의 소형센서시스템

구현을 위한 파일릿 라인 구축이다[13].

미국 CREOL과 MIT에서 Si 플랫폼기반의 도파로 [14], 일본 동경대에서는 Ge on Si 플랫폼기반의 도파로 [15], 프랑스의 CNRS은 chalcogenide 계열 도파로[16] 연구가 진행되고 있다. 이는 광통신 대역에서 이루어진 소형화의 과정을 밟고 있는 것으로 판단된다.

III. 결론

중적외선 대역은 분자지문이라는 고유의 특성을 측정하는 방식으로 많은 응용처를 보유하고 있어 연구자의 많은 관심을 받아 왔으며, 광원, 검출기, 관련 부품, 재료 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 그러나, QCL 에피가 성장된 웨이퍼가 장당 700만원, 단일 칩이 800만원, QCL 모듈이 1,300만원에 달하며, EC-QCL(External cavity quantum cascade laser)은 수 천만원으로 시판되고 있는 상황에서 상용화가 시작되었다고 보기가 힘든 상황이다. 현재는 그 쓰임이 군수 및 연

구 등의 특수분야에 제약되어 있어, 높은 가격을 유지하고 있으나 대형시장 창출을 통해 가격하락을 기대하고 있는 상황이고, 중적외선 분야의 대형시장으로는 센서시장이 가장 주목을 받고 있으며, 현재 각종 응용분야에서 센서로서의 적용 가능성에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 글에서는 중적외선 광센서가 가지는 특유의 장점에 비해 상용화에 어려움을 가지고 있는 이유를 신호간섭 및 다른 기술과의 차별성 확보에서 찾았으며, 이에 대한 해결 기술 및 동향에 대해 소개하였다. 이러한 분석은 기술적인 관점에서 바라본 사항이며, 기술적인 문제가 해결되어도 가격의 장벽에 직면할 것으로 보인다. 대형시장이 창출되면 자동적으로 가격하락이 될 것으로 기대를 하고 있으나, 센서시장은 반도체 DRAM 시장과 달리 다양한 형태의 센서들이 상존하므로, 범용 상용화에 어려움이 존재할 것으로 보이며 유럽에서 파일럿 라인을 구축하는 바도 이러한 문제를 범국가적으로 해결하려는 노력으로 해석된다. 다행스러운 점은 다른 센서와 달리 중적외선 대역의 분자감지 센서는 범용성을 가지고 있어 단일 센서로 큰 시장을 창출할 가능성이 높다. 그러나, 국외에서는 많은 연구가 진행되고 있으나 국내의 연구는 미진한 상태로 미래의 큰 산업적 잠재 시장에 대한 국가적인 관심이 필요하다고 본다.

용어해설

QCL(Quantum Cascade Laser) 반도체 양자우물구조에서 conduction band 내에 형성되는 양자상태간의 전이에 기반한 이득을 가지는 형태로 높은 이득을 이루기 위하여 반복적인 구조를 가지는 형태의 반도체 레이저 광원.

QTF(Quartz Tuning Fork) U자형의 포크모양을 한 높은 Q값을 가지는 음향파 공진기.

MCT(Mercury Cadmium Telluride) HgCdTe 물질을 지칭하는 단어로 물질의 밴드갭이 작아 중적외선 대역 검출물질로 사용

광빔살발생기(Optical Comb Generator) 다파장 광원의일종으로 발진하는 광주파수의 간격이 일정하고, 광주파수 자체의 주파수가 안정화된 광원.

부피밀도 단위 ppm, ppb, ppt 단위를 사용하며, 부피비를확실히 하기 위해 ppmv, ppbv, pptv로 사용.

* ppm(part per million, 10^{-6}),
ppb(part per billion 10^{-9}),
ppt(part per trillion 10^{-12}).

약어 정리

CEAS	Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy
CEPAS	Cantilever Enhanced Photoacoustic Spectroscopy
CRDS	Cavity Ring-Down Spectroscopy
DAS	Direct Absorption Spectroscopy
DFB	Distributed Feedback
EC-QCL	External Cavity Quantum Cascade Laser
FTIR	Fourier Transform Infrared
GC	Gas Chromatography
ICLAS	Intracavity Laser Absorption Spectroscopy
IMS	Ion Mobility Spectrometry
MDAL	Minimum Detectable Absorption Limit
MCT	Mercury Cadmium Telluride
MS	Mass Spectrometry
NDIR	Nondispersive Infrared
PAS	Photoacoustic Spectroscopy
QCL	Quantum Cascade Laser
QEPAS	Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy
QTF	Quartz Tuning Fork
TLS	Tunable Laser Spectroscopy

참고문헌

- [1] S. Borri et al., "Intracavity Quartz-Enhanced Photoacoustic Sensor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 9, 2014, pp. 091114:1-091114:4.
- [2] S. Kim, D. Lee, and T. Thundat, "Photothermal Cantilever Deflection Spectroscopy," *EPJ Tech. Instrum.*, vol. 1, no. 7, 2014, pp. 1-7.
- [3] FIGARO, "Gas Sensors & Modules," <https://www.figaro.co.jp/en/product/sensor/>
- [4] J. Wojtas et al., "Mid-infrared Trace Gas Sensor Technology Based on Intracavity Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy," *Sensors*, vol. 17, no. 3, 2017, pp. 513:1-513:9.
- [5] P. Sahay, S. T. Scherrer, and C. Wang, "Measurements of the weak UV Absorptions of Isoprene and Acetone at 261-275nm Using Cavity Ringdown Spectroscopy for Evaluation of a Potential Portable Ringdown Breath Analyzer," *Sensors*, vol.13, no. 7, 2013, pp. 8170-8187.
- [6] M. Pradhan et al., "Trace Detection of C₂H₂ in Ambient Air

- Using Continuous Wave Cavity Ring-Down Spectroscopy Combined with Sample Pre-concentration," *Appl. Phys. B* vol. 90, no. 1, 2008, pp. 1-9.
- [7] A. Maity et al., "Cavity Ring-Down Spectroscopy Using and EC-QCL Operating at $7.5\mu\text{m}$ for Direct Monitoring of Methane Isotopes in Air," *Laser Phys. Lett.*, vol. 14, no. 11, 2017, pp. 115701:1-115701:7.
- [8] M. Baudelet ed., *Laser Spectroscopy for Sensing: Fundamentals, Techniques and Applications*, Woodhead Publishing: Amsterdam, Netherlands, 2014, pp. 165-207.
- [9] T. Tomberg et al., "Sub-parts-per Trillion Level Sensitivity in Trace Gas Detection by Cantilever-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy," *Scientific Reports*, vol. 8, 2018, pp. 1848:1-1848:7.
- [10] J. Li et al., "Simultaneous Atmospheric CO , N_2O and H_2O Detection Using a Single Quantum Cascade Laser Sensor Based on Dual Spectroscopy Techniques," *Sens. Actuators B: Chem.*, vol.231, 2016, pp.723-732.
- [11] G.B. Rieker et al., "Frequency-Comb-Based Remote Sensing of Greenhouse Gases Over Kilometer Air Paths," *Optica*, vol. 1, no. 5, 2014, pp. 290-280.
- [12] K. Luke et al., "Broadband Mid-infrared Frequency Comb Generation in a Si_3N_4 Microresonator," *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 21, 2015, pp. 4823-4826.
- [13] MIRPHAB homepage, <https://www.mirphab.eu/mirphab-offer/>
- [14] V. Singh et al., "Mid-infrared Materials and Devices on a Si Platform for Optical Sensing," *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 15, no. 1, 2014, pp. 014603:1-014603:15.
- [15] J. Kang, M. Takenaka, and S. Takagi, "Novel Ge Waveguide Platform on Ge-on-Insulator Wafer for Mid-infrared Photonic Integrated Circuits," *Optics Exp.*, vol. 24, no. 11, 2016, pp. 11855-11864.
- [16] A. Gutierrez-Arroyo et al., "Optical Characterization at $7.7\mu\text{m}$ of an Integrated Platform Based on Chalcogenide Waveguides for Sensing Applications in the Mid-infrared," *Optics Exp.*, vol. 24, no. 20, 2016, pp. 23109-23117.