

상용 수소 가스 선별 검지 시스템 구현을 위한 고분해 수소 레이저 다이오드 시스템 구성에 관한 기초 연구

문평강, 신오순
숭실대학교

ansvudrkd9@gmail.com, osshin@ssu.ac.kr

A Preliminary Study on High-Resolution Hydrogen Laser Diode System Configuration for Commercial Selective Hydrogen Gas Detection Systems

Pyung Kang Moon, Oh-Soon Shin
Soongsil Univ.

요약

본 논문은 최근 급부상하고 있는 수소 산업의 안전성을 선제적으로 확보하기 위한 수소 가스 검지기 개발을 목표로, 수소를 선별적으로 검지할 수 있는 레이저 다이오드 개발에 관한 연구를 다룬다. 기존의 수소 검지가 가능한 가스 검지기들은 대부분 가연성 가스(탄화수소 계열)를 함께 검지하는 접촉연소식 센서 방식으로, 수소만을 선택적으로 검사하는 데에는 근본적인 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 물질 선택성이 우수한 Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) 방식의 수소 검지 적용에 대한 연구가 시도되어 왔다. 그러나 메탄 등 다른 가스들에 비해 수소는 선강도 기준 흡수율이 약 100,000 배 이상 낮아, 누출 검지나 ppm 수준의 저농도 검지 용도로 활용하는 데 기술적 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 기초 단계로서, 기존 수소 레이저 다이오드 관련 연구들을 체계적으로 분석하고, 기존 수소용 레이저 다이오드 대비 저농도 검지 민감도를 향상시킬 수 있는 레이저 다이오드 개발 방향을 제시하고자 한다.

I. 서 론

수소가 미래의 대표적인 청정 에너지원 중 하나로 부각됨에 따라, 이를 활용하기 위한 기본적인 법·제도적 기반이 단계적으로 도입되고 있다. 가스 공급 분야에서도 도시가스에 일정 비율의 수소를 혼입하여 공급하는 것을 목표로 시범사업이 추진되고 있으며, 혼입 농도를 점진적으로 증가시키는 방향으로 실증이 진행 중이다. 그러나 수소는 매우 높은 위험도를 갖는 가스로, 간헐적으로 폭발 사고가 발생하는 메탄의 위험도가 2 인 반면 수소의 위험도는 17.75로, 메탄 대비 8 배 이상 높은 것으로 알려져 있다. 또한 수소는 동일 농도로 누출되더라도 메탄보다 분자량이 작아 확산 속도가 매우 빠르기 때문에 검지가 상대적으로 더욱 어렵다. 이러한 위험도와 확산 특성을 고려할 때, 수소는 메탄보다 훨씬 높은 민감도의 검지가 요구되지만, 핵심 요소인 저농도 수소 검지 센서의 실증 수준은 여전히 낮은 상황이다[1].

고분해능 수소 가스의 선별적 검지를 위한 레이저 다이오드(Laser Diode: LD) 개발 연구는 2010년대 중반부터 국내외에서 일부 진행되어 왔으나, ppm 단위의 저농도 수소를 실시간으로 선별 검지한 사례는 아직 보고되지 않았다. 접촉연소식 가스 센서를 이용할 경우 탄화수소(HC) 계열 가스 전반에 대한 검지가 가능하며 수소 역시 검지할 수 있으나, 수소만을 선택적으로 검지하는 데에는 근본적인 한계가 존재한다[2]. 가스별 선별 검지가 중요한 이유는 특정 물질의 존재 여부를 추가적인 확인 절차 없이 즉각적이고 신뢰성 있게 판단할 수 있는 기반을 제공하기 때문이다[3].

이러한 물질별 선별 검지를 효과적으로 구현할 수 있는 고난이도 검출 기법 중 하나인 Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) 방식은 이미 주요 산업용 가스를 대상으로 고분해능 선별 검지를 실현한 바 있다[4]. 특히 메탄의 경우, TDLAS 방식을 통해 검출한계(Limit of Detection: LoD) 0.1 ppm, 초당 2 회 이상의 측정 속도, 전 농도 범위에서 ± 1 ppm 수준의 우수한 오차 특성을 갖는 센서들이 상용화되어 다양한 응용 분야에 적용되고 있다. TDLAS 방식은 장시간 사용 이후에도 높은 센서 신뢰도를 유지할 수 있다는 점에서, 누출 시 치명적인 영향을 초래할 수 있는 물질의 검지에 특히 적합한 기술이다. 따라서 고분해능 수소 LD 개발은 기술적 난이도가 매우 높고 극복해야 할 과제가 많음에도 불구하고, 수소 산업의 안전성 확보를 위해 반드시 해결해야 할 핵심 과제라 할 수 있다.

II. 고분해 수소 선별 검지 센서 및 시스템 개발의 높은 난이도

2.1 낮은 선강도(Line Strength)

현재 가장 성숙한 기술 수준에 도달한 TDLAS 기반 가스 센서는 메탄(CH₄) 검지용 센서이다. 메탄 분자는 적외선 영역에서 전기 쌍극자 전이(Electric Dipole Transition)를 통해 강한 흡수를 나타내는 반면, 수소(H₂)는 분자 구조적 특성으로 인해 미약한 사중극자 전이(Quadrupole Transition)에 의해서만 빛을 흡수하므로 특정 파장대에서의 반응성이 매우 낮다. 구체적으로, 메탄은 약 1,653 nm 부근을 중심 파장으로 하며 해당 흡수선의 선강도는 약 10^{-21} cm/molecule 수준인 반면, 수소는 액 2,122 nm 부근을 중심 파장으로

하고 선강도는 약 10^{-26} cm/molecule에 불과하다. 이는 수소의 선강도가 메탄 대비 약 10^5 배 이상 약함을 의미한다. 따라서 동일 농도의 가스를 검지한다고 가정할 경우, 수소 검지 시스템은 메탄 검지 시스템 대비 약 10 만 배 이상의 민감도를 구현해야 하는 근본적인 기술적 과제를 갖게 된다.

2.2 넓은 흡수선폭(Absorption Linewidth)

흡수선의 폭이 좁을수록 배경 노이즈와의 구분이 용이해지며, 이는 선별적 검지 성능 향상에 직접적으로 기여한다. 그러나 수소는 메탄에 비해 훨씬 넓은 반치폭(Full Width at Half Maximum: FWHM)을 갖는다. 이는 수소 분자의 질량이 매우 작아 도플러 확장(Doppler Broadening)이 크게 발생하기 때문으로, 메탄 대비 약 2.8 배 넓은 선폭을 형성한다[5]. 이와 같은 넓은 흡수선폭은 검지 선택성(Selectivity)을 저하시켜, 실제로 2,122 nm 파장대 인근에서 H_2O 및 CO_2 와 같은 주변 가스의 흡수선 간섭을 심하게 받는 원인이 된다. 결과적으로 수소의 선별적 검지를 고분해능으로 구현하는 데 있어 추가적인 기술적 난이도를 유발한다.

2.3 낮은 레이저 출력

LD 제조 기술이 고도화되었음에도 불구하고, 반도체 재료의 물리적 한계로 인해 수소용 LD는 출력 확보에 본질적인 제약을 가진다. 상용화된 메탄용 LD는 일반적으로 20mW 이상의 출력을 안정적으로 제공하는 반면, 수소용 LD의 경우 5mW 이상의 출력을 구현하기는 매우 어려울 것으로 예상된다. 메탄의 중심 파장인 약 1,653 nm 대역은 인듐 갈륨 비소(InGaAs) 계열 물질을 이용해 비교적 안정적으로 성장시킬 수 있으며, 결정 격자 구조 또한 안정적이어서 전기-광 변환 효율이 높다. 반면, 수소 검지를 위한 약 2,122 nm 파장대 구현을 위해서는 인듐(In) 함량을 대폭 증가시켜야 하며, 이로 인해 기판과의 격자 정합성이 저하되어 격자 왜곡(Strain)이 발생한다. 이러한 격자 왜곡은 주입된 전류가 빛으로 변환되지 못하고 열로 소산되는 비율을 증가시키며, 결과적으로 출력 향상을 어렵게 만든다. 레이저 출력 저하는 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)를 감소시키는 직접적인 원인이 되며, 이는 ppm 수준의 저농도 수소 검지 민감도를 확보하는 데 결정적인 한계로 작용한다. 실제로 기존 TDLAS 기반 수소 검지 연구들이 대부분 %VOL 단위 이상의 농도 범위를 벗어나지 못한 주요 원인 역시 이러한 출력 제약에 기인한다.

이 외에도 높은 Noise Equivalent Power (NEP)로 인해 발생하는 열 잡음을 억제하기 위해, LD 내부의 Thermo-Electric Cooler (TEC)가 고정밀로 동작해야 하는 추가적인 기술적 난제가 존재한다.

III. 고분해 수소 가스 선별 검지를 위한 실험 설계

기존 연구 결과를 종합하고 새로운 신호 처리 알고리즘을 적용하여, 수소 검지에 최적화된 TDLAS-Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS) 기반의 고정밀 실험 설계를 제안한다. 본 설계의 핵심은 미약한 흡수 신호를 극대화하기 위한 광학계 설계와, 잡음을 극한까지 억제하는 고급 신호 처리 알고리즘의 결합에 있다.

3.1 전체 시스템 구성

제안하는 실험 시스템은 크게 광원 구동부, 고광경(Optical Path) 광학부, 신호 검출 및 처리부로 구성된다. 광원으로는 중심 파장이 약 2,120 nm 인 DFB LD를 사용하며, 광학계에는 30 m 이상의 유효 광경로를 확보할 수 있는 Herriott Cell을 적용한다. 신호처리 기법으로는 WMS 와 Adaptive Kalman Filter (AKF)를 결합한 구조를 채택한다. LD Driver는 LD의 온도와 구동 전류를 정밀 제어하여 발진 파장을 안정적으로 가변시키며, Herriott Cell은 입사된 레이저 빔을 다중 반사시켜 30 m 이상의 광경로를 형성한다. Photo Diode (PD)에서는 투과광을 전기신호로 변환한 후, 하드웨어적으로 대역통과필터 (Band-Pass Filter: BPF)와 노치 필터(Notch Filter)를 거쳐 Lock-in Amplifier에서 1 차 증폭이 이루어진다. 이후 5 차 필터(5-th Order Filter)를 적용하고, DAQ를 통해 2f (Second Harmonic) 신호를 생성한다. 최종적으로 PC 상에서 MATLAB을 이용해 전처리용 IIR 대역통과필터를 적용하여 S/W 적으로 전처리용 IIR BPF를 적용한 뒤, Lock-in 증폭 및 저역통과필터(Low-Pass Filter)와 AKF 알고리즘을 순차적으로 적용하여 수소 농도를 산출한다[6].

3.2 핵심 실험 설계 내용 및 기술적 근거

수소의 미세한 흡수 신호를 효과적으로 검출하기 위해, 본 연구에서는 직접흡수분광법(DAS) 대신 WMS 방식을 적용하여 2f 신호를 처리함으로써 잡음을 억제하고 SNR을 향상시킨다[7]. 특히 2f 신호의 피크 값을 입사 광강도에 해당하는 1f 신호로 정규화함으로써 광원 출력 변동에 대한 영향을 최소화할 수 있다. 또한 수소의 낮은 선강도를 보상하기 위해서는 최소 30 m 이상의 광경로 확보가 필수적이다. 이를 위해 거울 간 거리가 약 50 cm 내외인 Herriott Cell을 사용하여 약 60-100 회의 다중 반사를 통해 장광경로를 구현하며, 이 때 거울 반사율은 99% 이상이 요구된다[8]. PD는 수소 검지 파장대에 최적화된 Extended-InGaAs 구조를 적용하며, 차단 파장(Cutoff Wavelength)이 최소 2.3-2.6 μm 범위에 해당하는 소자를 사용하는 것이 바람직하다. 또한 암전류(Dark Current)를 최소화하고 SNR을 확보하기 위해, 2-3 단의 TEC가 포함된 냉각형 PD 사용이 요구된다[9]. 마지막으로 AKF를 적용하여 환경 진동, 온도 변화 등으로 인해 발생하는 비가우시안(Non-Gaussian) 잡음을 실시간으로 추적·제거한다. 이를 통해 기존 이동 평균(Moving Average) 필터 대비 시간 지연 없이 약 30% 이상의 추가적인 잡음 감소 효과를 기대할 수 있다[10]. AKF는 상태 전환(State-Switching) 메커니즘을 기반으로 하여, 시스템이 안정적인 경우에는 좁은 추적 창(Window)을 사용해 정밀도를 높이고, 급격한 농도 변화나 외란이 발생할 경우에는 창을 가변적으로 조정하여 응답 속도를 향상시키는 실시간 적응형 잡음 제거 기법이다[11].

IV. 결론 및 향후과제

일반적인 가스 검지 센서의 성능은 주로 세 가지 핵심 지표를 기반으로 수행된다. 첫째, 정확도(Accuracy)와 밀접한 관련이 있는 결정계수 R^2 을 통해 수소 농도 변화에 따른 측정 데이터의 선형성을 평가할 예정이다. 일반적으로 가스 센서의 선arity를 확보하기 위해서는 $R^2 > 0.99$ 이상의 성능이 요구된다[12]. 둘째, TDLAS 기반 수소 센서 시스템의 장기적 안정성을 평가하기 위해

정밀도(Precision) 지표와 연관된 알란분산(Allan Variance)를 산출할 예정이다. 값을 도출한다. 알란분산 분석은 시간에 따른 신호 변동 특성을 정량적으로 평가할 수 있어, 센서의 드리프트 특성 및 최적 평균화 시간 도출에 효과적인 방법으로 알려져 있다[13]. 마지막으로, LoD 를 도출하여 제안된 시스템이 저농도 수소에 대해 실제 검지 성능을 확보하는지 검증할 계획이다. 특히 본 연구에서는 100 ppm 수준의 수소 농도를 기준으로 신뢰성 있는 검지 가능 여부를 중점적으로 확인하고자 한다[14]. 이러한 성능 평가를 통해 제안된 고분해 수소 가스 선별 검지 시스템의 실현 가능성과 한계를 분석하고, 향후 ppm 이하 수준의 초저농도 검지를 위한 광학계 및 신호 처리 알고리즘 고도화 방향을 제시하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 박지연 외, "파장가변형 레이저 흡수 분광법을 이용한 수소 농도 분석," *Journal of Energy & Climate Change*, vol. 17, no. 2, pp. 95–107, 2022.
- [2] V. Avetisov *et al.*, "Hydrogen Sensor Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy," *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5313, 2019.
- [3] T. Liang *et al.*, "Highly Sensitive Hydrogen Sensing Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy with a 2.1 μm Diode Laser," *Chemosensors*, vol. 10, no. 8, p. 321, 2022.
- [4] M. A. Bolshov *et al.*, "Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in the process industries – A REVIEW," *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 23, no. 3, 2007.
- [5] C. Tong *et al.*, "Laser Linewidth Analysis and Filtering/Fitting Algorithms for Improved TDLAS-Based Optical Gas Sensor," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5130, 2023.
- [6] W. Jin *et al.*, "Robust CH₄-TDLAS sensor based on state-switching adaptive Kalman filtering," *Optics Express*, vol. 33, no. 15, p. 31896, 2025.
- [7] J. Zheng *et al.*, "TDLAS second harmonic demodulation based on Hilbert transform," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 3, p. e0265225, 2022.
- [8] M. Chen *et al.*, "Hydrogen peroxide detection based on near-infrared TDLAS and Herriott cell," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 248, p. 119281, 2021.
- [9] Q. Wang *et al.*, "Portable TDLAS Sensor for Online Monitoring of CO₂ and H₂O Using a Miniaturized Multi-Pass Cell," *Sensors*, vol. 23, no. 5, p. 2501, 2023.
- [10] Y. Zhou *et al.*, "Measurement precision improving with adaptive Kalman filter for quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy methane sensor," *AIP Advances*, vol. 15, no. 7, p. 075335, 2025.
- [11] Y. Cao *et al.*, "Humidity enhanced N₂O photoacoustic sensor with a 4.53 μm quantum cascade laser and Kalman filter," *Photoacoustics*, vol. 24, p. 100303, 2021.
- [12] X. Liu *et al.*, "TDLAS-WMS second harmonic detection based on spectral analysis," *Optics Communications*, 2022.
- [13] Z. Chen *et al.*, "A Modified Empirical Mode Decomposition Algorithm in TDLAS for Gas Detection," *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 6, 2014.
- [14] Y. Ai *et al.*, "A Remote Sensor System Based on TDLAS Technique for Ammonia Leakage Monitoring," *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 4181, 2021.