

Received: 2024/05/11
Revised: 2024/05/17
Accepted: 2024/06/03
Published: 2024/06/30

***Corresponding Author:**

Min-Gyu Jeon

Dept. of Mechanical Engineering, Republic of Korea
Naval Academy

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea

Tel: +82-55-907-5335

E-mail: mgjeon@navy.ac.kr

H₂O 가스 흡광도의 고압환경 측정기술 개선

Enhancement of High-pressure Environmental Measurement Technology for H₂O Gas Absorbance

전민규*

해군사관학교 기계시스템공학과 조교수

Min-Gyu Jeon*

Assistant Professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of
Korea Naval Academy

Abstract

본 연구에서는 광학식 흡광도 측정방법인 TDLAS를 이용하였다. 연소과정을 정확히 이해하기 위해 엔진의 연소실 내부를 측정할 필요가 있다. 연소실 내에서 연소과정을 이해하기 위해서 필수적으로 발생하는 고온 및 고압환경에서의 변화를 계측해야 한다. 이러한 노력으로 우리의 주요 목표는 H₂O 가스의 압력 및 온도를 매개변수로 세심하게 조절하여 TDLAS 측정의 정밀도를 높이고자 하였다. 이로써 실험적 데이터를 바탕으로 이론적 데이터의 개선이 가능해 진다.

Accurate comprehension of the combustion process necessitates interior measurements of the engine's combustion chamber. Such comprehension mandates measurement of alterations within the chamber's high-temperature and high-pressure environment. Our principal objective was meticulous regulation of H₂O gas pressure and temperature to refine the precision of tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) measurements. This endeavor enables the enhancement of theoretical data based on empirical findings.

Keywords

흡광도(Absorbance), 고온(High-temperature),
고압(High-pressure),
가변 다이오드 레이저 흡수 분광법(TDLAS)

Acknowledgement

본 논문은 2024년 해군사관학교 해양연구소
학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

1. 서론

엔진, 버너, 가스터빈 등 연소 관련 부품에서 연료를 연소시켜 열 에너지와 운동에너지를 얻는다. 이 과정에서 H₂O뿐 아니라 NO_x, CO₂, CO 등 대기에 유해한 배기가스를 생성한다. 이러한 문제는 유해한 가스의 배출을 줄이고 적절히 제어함으로써 해결할 수 있다. 그리고 최근 발사체의 추진시스템의 개발이 군 또는 민간에서 활발히 진행되고 있다. 추진시스템의 정밀한 제어는 필수적이며 실시간으로 연료의 분사상태와 연소상태에 대한 평가가 이루어져야 한다. 이와 같이 다양한 이유로 연소 부산물인 다양한 가스의 정밀한 계측이 필요하다 할 수 있다.

일반적으로 연소상태의 평가에는 열전대를 이용한다. 열전대는 1점 표본추출에 사용되며 접촉식 측정 방법으로서 불규칙적으로 변화하는 연소상태의 평가에는 적합하지 않다[1-3]. 특히 폭발과 같이 짧은 시간에 급변하는 열적거동의 측정에는 반응성이 떨어 지므로 타당한 측정법이 아니다. 그 외에도 다양한 가스의 측정법이 존재한다. CO, CO₂, NO_x, NH₃ 가스를 감지하기 위하여 반도체형 센서[4]가 이용되었으며, CO₂ 측정에는 surface acoustic wave (SAW) 방식의 센서가 적용되었다[5]. 이 밖에도 다양한 가스에 대하여 TDLAS(tunable diode laser absorption spectroscopy)를 이용한 계측이 수행된 바 있다[6-8]. 추가적으로 2차원 공간의 측정을 고려한 CT-TDLAS를 이용하는 온도 측정이 대표적인 예이다[9-13].

본 연구에서는 광학식 흡광도 측정법인 TDLAS 기술을 이용하여 연소의 대표적 부산물인 H₂O 가스의 흡광도를 정밀하게 측정하고자 한다. 연소의 경우 일반적으로 연소실 내부에서 많이 이루어진다. 연소실 내부에서는 높은 온도와 압력 환경이 주어질 것이며, 폭발과 같은 메커니즘을 이해하기 위해서는 압력의 변화가 매우 중요하다. 이러한 환경에서 H₂O 가스의 흡광도의 측정 정밀도를 높이기 위해 압력과 온도를 매개변수로 두어 단계별로 실험을 수행하였다. 이러한 노력으로 이론적 데이터 사용에 실험적 변수의 추가 적용으로 개선이 가능해질 것이다.

2. 광학측정의 원리

가스 분자의 종류에 따라 특정 파장의 빛을 흡수하는 형태가 다르다. 이러한 특성을 활용한 것이 TDLAS를 이용한 흡광도 측정기술이다. 이 방법은 대상 가스에 조사되는 광원의 입사광과 투과광의 비율을 활용하여 농도와 온도를 측정할 수 있다. 이 관계는 식 (1)과 같이 Lambert-Beer 법칙을 기반으로 설명될 수 있다.

$$\frac{I_{tr}(\lambda)}{I_e(\lambda)} = \exp\{-A_\lambda\} = \exp\left\{-\sum_i \left(P \cdot n_i \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) \cdot G_{vi,j}\right)\right\} \quad (1)$$

여기서, I_{tr} : 투과광,
 n_i : 종밀도,
 I_{in} : 입사광,
 L : 측정 길이,
 A_λ : 흡광도,
 $S_{i,j}$: 선강도,
 P : 압력,
 $G_{vi,j}$: 확장함수.

본 연구에서는 연소 부산물인 H₂O 가스의 흡광도 분석을 위해 메탄과 공기의 예혼합 화염을 이용하고자 한다. 연소 부산물은 다양하므로 H₂O 가스의 흡광도를 분석하기 위해서는 다른 물질에 대한 간섭을 확인해야 한다. 흡광도를 이론적으로 구성하기 위하여 HITRAN database를 활용하였다. 기본적으로 대상 가스의 종류에 따라 흡수가 나타나는 대표 파장의 영

역이 다르다. Fig. 1은 연소 부산물인 H₂O 가스와 불연소되었을 것으로 예상되는 CH₄의 간섭을 확인하고자 한 결과이다. 1363.8 nm – 1369.8 nm 파장 영역에서 300K인 H₂O 가스의 흡광도는 강하게 나타나며, 반대로 CH₄의 흡광도는 상대적으로 “0”에 근접하므로 서로 간섭하지 않음을 확인 가능하다.

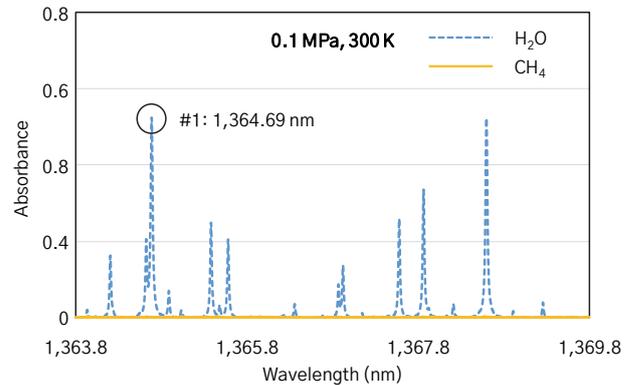


Fig. 1. Examining the interference in the theoretical absorption spectrum (1363.8 nm – 1369.8 nm)

Fig. 2는 대기압(0.1 MPa) 조건에서 온도 변화에 따른 H₂O 가스의 흡광도 변화를 보인다. Fig. 3는 상대적으로 고압(1.0 MPa) 조건에서 Fig. 2와 동일한 온도에서 H₂O 가스의 흡광도 변화를 보여준다. 동일 압력 조건에서 온도가 상승함에 따라 흡광도가 감소하는 것을 이론적으로 확인 가능하다. 고압 조건에서는 측정가스의 압축에 의한 흡광도의 확장현상으로 실험적 확인이 필요하다.

일반적으로 흡광도 값을 이론적으로 재구성하기 위해서는 측정영역의 길이(L), 종밀도(n), 흡수계수(α)가 필요하며, 식 (2)와 같다.

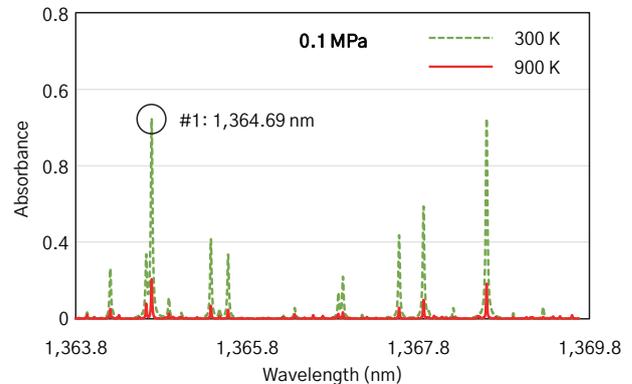


Fig. 2. Comparing H₂O absorption spectra across temperature changes under atmospheric pressure conditions

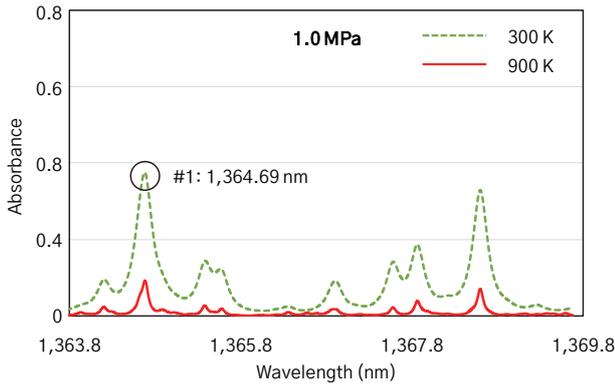


Fig. 3. Comparing H₂O absorption spectra across temperature changes under high-pressure conditions

$$A_{\lambda,j} = \sum_j n_j \cdot L_j \cdot \alpha_{\lambda,j} \quad (2)$$

3. 가스 흡광도의 고압환경 측정방법

이론으로 재구성한 흡광도와 실제 실험으로 측정된 흡광도를 비교하여 이론 흡광도의 보정 정보를 구하고자 한다. 실험은 Fig. 4와 같이 밀폐 상태를 구현할 수 있는 가스 챔버(gas chamber) 시스템을 이용하였으며, H₂O 가스의 온도 및 압력 조건을 변경하여 흡광도 측정을 수행하였다. 실험에서 사용된 H₂O 가스의 농도는 2.6 %로 제어하였다. Table 1은 Fig. 4에 나타난 시스템으로 변경한 H₂O 가스의 온도 및 압력 정보이다.

Table 1. Experimental parameters for optical measurement

| Target gas | Temperature (°C) | Pressure (MPa) | Concentration (%) |
|------------------|------------------|----------------|-------------------|
| H ₂ O | 100 (373.15K) | 0.1 - 1.0 | 2.6 |
| | 300 (573.15K) | 0.1 - 1.0 | 2.6 |
| | 500 (773.15K) | 0.1 - 1.0 | 2.6 |

본 실험에서 온도는 100 °C (373.15 K)부터 500 °C (773.15 K)까지 200 °C 단위로 조정하여 총 3가지 온도로 구성하였다. 각 온도 상태에서 압력은 0.1 MPa - 1.0 MPa 단위로 10단계로 조정하였다. H₂O 가스의 흡광도를 분석하기 위해 1,330 nm - 1,370 nm 파장 대역을 조사할 수 있는 레이저(Santec, HSL-200-30-TD, 30 kHz)를 사용하였다. 또한 레이저의 광원을 균일한 강도로 분할하기 위하여 collimator를 사용하였다. 레이저의 투과광은 photodiode로 측정하여 데이터 장치(HIOKI E.E. Co., 8861 Memory Highcoda HD Analog)에 기록하였다. 흡광도 분석에는 Direct Absorption Spectroscopy(DAS)법을 적용하였다.

4. 고온 및 고압 흡광도 분석 결과

Fig. 5와 Fig. 6는 H₂O 가스의 흡광도 변화를 Fig. 4의 특수 가스 챔버를 이용하여 고정된 압력에 대해 온

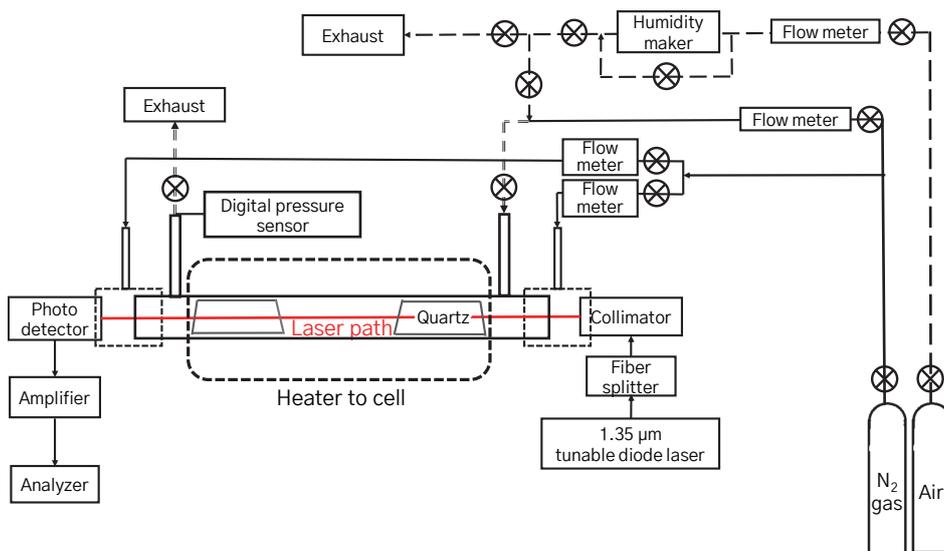


Fig. 4. Design and construction of an experimental device for temperature and pressure variation

도를 조정하여 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5는 0.1 MPa 압력 조건에서 373.15 K에서 773.15 K으로 온도를 상승시켰으며 Fig. 2의 이론으로 재구성한 흡광도와 유사하게 고온으로 갈수록 흡광도의 세기가 감쇠함을 확인 가능했다. Fig. 6는 1.0 MPa의 고압 조건에서 측정된 흡광도를 보이며, Fig. 5와 동일하게 고온으로 갈수록 흡광도의 세기가 감쇠함을 실험을 통해 확인하였다.

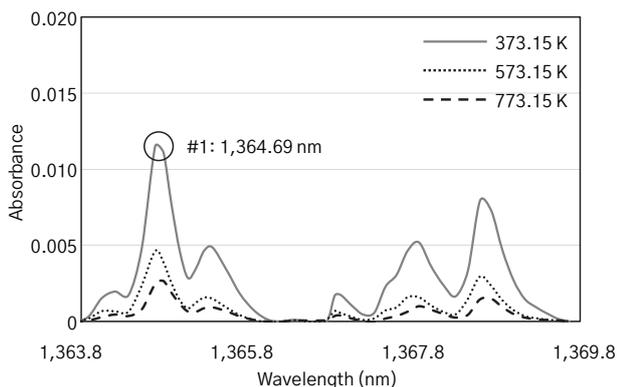


Fig. 5. Comparing H₂O absorption spectra across temperature changes under atmospheric pressure conditions: an experimental study

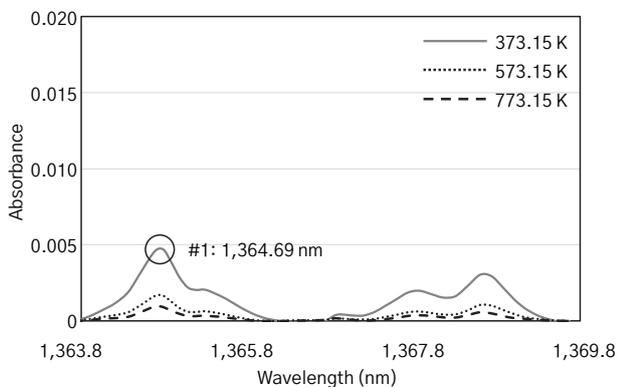


Fig. 6. Comparing H₂O absorption spectra across temperature changes under high-pressure conditions: an experimental study

또한 실험으로 측정된 흡광도와 이론으로 재구성한 흡광도의 세기를 비교하면 차이가 발생함을 알 수 있다. 따라서 이론 데이터를 실제 실험 데이터와 일치시키기 위한 교정 작업이 필요함을 알 수 있다. 흡광도의 세기가 뚜렷한 대표 파장 #1(1363.69 nm)에 실험 데이터와 이론 데이터에서 취득한 식 (3)의 보정계수 β 를 곱하여 Fig. 7의 결과를 구할 수 있다. 여기서 T 는 측정 온도(K)이다.

$$\beta = -0.002T^2 + 0.2562T - 32.092 \quad (3)$$

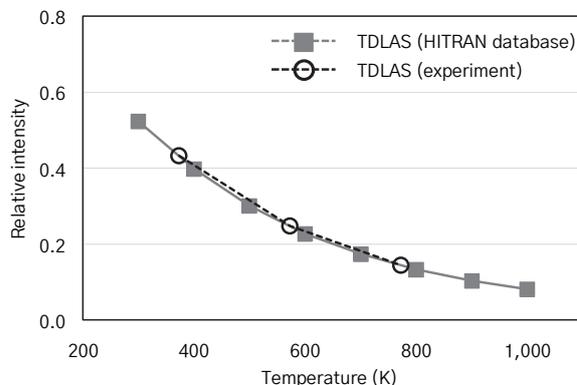


Fig. 7. Correction of theoretical data using experimental data (0.1 MPa, #1; 1364.69 nm, H₂O concentration: 2.6 %)

식 (3)의 적용 가능성을 판단하기 위하여 2.6 %의 H₂O 흡광도를 0.1MPa 조건에서 200 °C(473.15 K)와 400 °C(673.15 K)에서 추가 측정하여 비교평가하였다. 그 결과는 Fig. 8에 나타낸 것과 같으며, 선형 피팅의 R^2 값은 0.9969로 높은 일치성을 보였다.

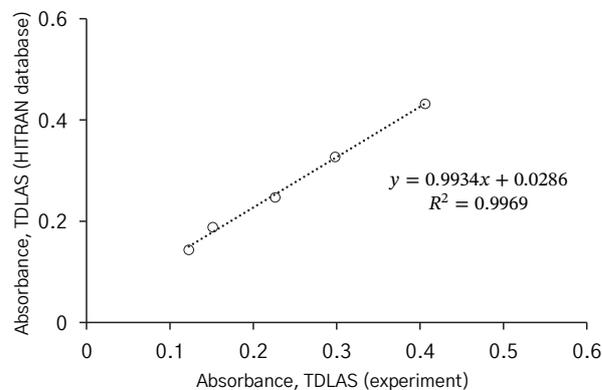


Fig. 8. Comparison of absorbance measurement data and theoretical data (#1)

5. 결론

본 연구는 고온 및 고압 조건을 조정할 수 있는 특수 가스 챔버를 이용하여 흡광도 측정 실험을 수행하였다. 연소 부산물 중 H₂O 가스의 흡광도 측정을 고려하기 위해 2.6 %의 농도로 조정하여 실험을 수행하였으며, 각 온도별 압력 변화에 따라 흡광도의 변화를 측정하였다. 이론 흡광도와 실험으로 측정된 흡광도는 동일압 조건에서 고온으로 갈수록 흡광도의 세기

가 감쇠하는 동일한 패턴을 보임을 확인할 수 있었다. 다만 대표파장 #1을 기준으로 흡광도의 세기를 비교하였을 경우 이론 흡광도가 실험 흡광도 대비 35배 이상 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 흡광도를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 보정계수가 필요함을 알 수 있었으며 R^2 값이 0.9969로 계산되어 높은 신뢰도를 확보할 수 있었다. 이로써 고온 및 고압 조건을 고려한 흡광도 측정 정밀도를 향상시킬 수 있었으며 연소실 내부나 폭발화염과 같은 환경에서의 측정에 적용 가능성을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] M. V. Heitor, A. L. N. Moreira, "Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, pp. 259-278, 1993.
- [2] S. Brohez, C. Delvosalle, G. Marlair, "A Two-Thermocouples Probe for Radiation Corrections of Measured Temperature in Compartment Fires," *Fire Safety Journal*, Vol. 39, pp. 399-411, 2004.
- [3] C. S. Kim, S. D. Hong, Y. W. Kim, "Radiation-corrective gas temperature measurement in a circular channel," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 75, pp. 157-167, 2012.
- [4] N. Dossi, R. Toniolo, A. Pizzariello, E. Carrilho, E. Piccin, S. Battiston, G. Bontempelli, "An Electrochemical Gas Sensor based on Paper Supported Room Temperature Ionic Liquids," *Lab on Chip*, Vol. 12, No. 1, pp. 153-158, 2012.
- [5] W. Wang, C. B. Lim, K. K. Lee, S. S. Yang, "Wireless Surface Acoustic Wave Chemical Sensor for Simultaneous Measurement of CO₂ and Humidity," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, Vol. 8, No. 3, paper No. 031306, 2009.
- [6] H. Sumizawa, H. Yamada, K. Tonokura, "Real-time monitoring of nitric oxide in diesel exhaust gas by mid-infrared cavity ring-down spectroscopy," *Applied Physics B*, Vol. 100, No. 4, pp. 925-931, 2010.
- [7] T. N. Anderson, R. P. Lucht, S. Priyadarsan, K. Annamalai, J. A. Caton, "In situ measurements of nitric oxide in coal-combustion exhaust using a sensor based on a widely tunable external-cavity GaN diode laser," *Applied Optics*, Vol. 46, No. 19, pp. 3946-3957, 2007.
- [8] J. K. Magnuson, T. N. Anderson, R. P. Lucht, "Application of a diode-laser-based ultraviolet absorption sensor for in situ measurements of atomic mercury in coal-combustion exhaust," *Energy and Fuels*, Vol. 22, No. 5, pp. 3029-3036, 2008.
- [9] T. Kamimoto, Y. Deguchi, Y. Kiyota, "High temperature field application of two dimensional temperature measurement technology using CT tunable diode laser absorption spectroscopy," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 46, No. A, pp. 51-57, 2015.
- [10] D. W. Choi, M. G. Jeon, G. R. Cho, T. Kamimoto, Y. Deguchi, D. H. Doh, "Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS)," *Journal of Thermal Science*, Vol. 25, No. 1, pp. 84-89, 2016.
- [11] M. G. Jeon, Y. Deguchi, T. Kamimoto, D. H. Doh, G. R. Cho, "Performances of new reconstruction algorithms for CT-TDLAS (computer tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy)," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, pp. 1148-1160, 2017.
- [12] M. G. Jeon, D. H. Doh, Y. Deguchi, "Measurement enhancement on two-dimensional temperature distribution of Methane-Air premixed flame using SMART algorithm in CT-TDLAS," *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 22, 4955, 2019.
- [13] M. G. Jeon, J. W. Hong, D. H. Doh, Y. Deguchi, "A study on two-dimensional temperature and concentration distribution of Propane-Air premixed flame using CT-TDLAS," *Modern Physics Letters B*, Vol. 34, No. 7n9, 2040020, 2020.