



Received: 2024/11/05
Revised: 2024/11/08
Accepted: 2024/11/28
Published: 2024/12/31

***Corresponding Author:**

Soon-Kook Hong
Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si, Gyung-sangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5335
E-mail: hsk753@gmail.com

Abstract

본 연구는 친환경 선박의 운용을 위해 고려되는 대체 에너지원 암모니아 가스 사용에 앞서 가스 누출 농도측정에 관한 연구이다. 가스 측정에 광학식 측정법인 TDLAS를 이용하였으며 흡광도 계측의 정밀도를 평가하기 위해 딥러닝 다중 분류 모델을 적용하였다. 또한 흡광도 추출의 정밀도 향상을 위해 직접흡수분광법의 개선 가능성을 평가한다.

This study investigates the measurement of gas leakage concentration preceding the use of ammonia gas, a potential alternative energy source for eco-friendly ships. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), an optical measurement technique, was employed for gas detection, and a deep learning multi-classification model was applied to evaluate the precision of absorbance measurements. Furthermore, the study explores the potential improvements in direct absorption spectroscopy to enhance the accuracy of absorbance extraction.

Keywords

가스 누출(Gas Leakage), 암모니아(Ammonia), 농도(Concentration), 가변 다이오드 레이저 흡수 분광법(TDLAS), 다중 분류(Multi-classification)

Acknowledgement

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-23-030).

가스 누출 농도측정을 위한 딥러닝 다중 분류 모델 적용 직접흡수분광법 연구

Application of a Deep Learning Multi-classification Model for Direct Absorption Spectroscopy in Measuring Gas Leak Concentration

전민규¹, 최영두², 한민석³, 이헌기¹, 김세라⁴, 장원석⁵, 홍순국^{6*}

¹해군사관학교 기계시스템공학과 조교수

²해군 소령/해군사관학교 전자제어공학과 조교수

³해군사관학교 전자제어공학과 부교수

⁴해군사관학교 기초과학과 부교수

⁵한화시스템 해양시스템1팀 수석연구원

⁶해군 대령/해군사관학교 기계시스템공학과 교수

Min-Gyu Jeon¹, Youngdoo Choi², Min-Seok Han³, Hun-Kee Lee¹, Sera Kim⁴, Wonseok Jang⁵, Soon-Kook Hong^{6*}

¹Assistant professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy

²LCDR, ROK Navy/Assistant professor, Dept. of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

³Associate professor, Dept. of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

⁴Associate professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

⁵Chief engineer, Naval System Team 1, Hanwha Systems

⁶CPT, ROK Navy/Professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy

1. 서론

지구 온난화를 완화하기 위해 탄소중립의 개념이 도입되고 전 세계적으로 온실가스 등의 순 배출량을 줄이고자 노력하고 있다. 해운 산업에서 탄소 배출을 줄이기 위해 친환경 선박을 운용하기 위해 다양한 방식을 고려하고 있으며 탈탄소 대체 에너지를 이용하고자 한다. 더 나아가 대한민국 해군은 차세대 함정의 전기 추진체계에 관한 연구를 국내 기업과 도모하고 있다. 미 해군 또한 국내 기업과 미래 함정 기술에 대해 글로벌 협력 강화를 위한 논의를 하고 있다.

이처럼 민간과 국방 모두 친환경 선박에 대한 필요성을 느끼고 있다. 친환경 선박 운용을 위한 대체 에너지로서 액화천연가스(LNG), 수소(H₂), 암모니아(NH₃) 등 다양한 가스 자원을 추진 연료로 사용할 수 있으며, 이를 달성하기 위해서는 가스의 농도를 정밀 측정하고 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 특히 최근 친환경 선박의 연료로 고려되고 있는 암모니아 가스를 운용하려면 선박이라는 밀폐되고 제한된 공간에서 가스 누출 사고로부터 승조원의 안전을 보장하기 위한 정밀 농도측정이 이루어져야 한다.

가스 측정법에는 다양한 방법들이 있지만 그중 작업자가 접근하기 어려운 공간에서도 비접촉식 측정이 가능한 TDLAS(tunable diode laser absorption spectroscopy)[1-3]를 이용한 흡광도 측정법이 있다. 흡광도 측정에는 일반적으로 직접흡수분광법(DAS, direct absorption spectroscopy)[4-8]을 이용하며 흡수가 없는 base line과 흡수가 일어난 line과의 상대 비교를 이용한다. 하지만 해당 방법은 질소 등의 비활성 기체로 흡수가 없는 환경을 구축해야 하는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 흡광도 추출 과정에서 base line 추출 과정의 중요성을 검토하고자 딥러닝 다중 분류(multi-classification) 모델[9-11]을 적용하여 암모니아 가스의 농도별 흡광도 측정의 정밀도를 평가하고자 한다. 더불어 이 방법을 통해 직접흡수분광법의 개선 가능성을 검토하고자 한다.

2. TDLAS 측정 이론

특정 가스의 분자의 종에 따라 레이저 광의 파장을 선택적으로 조사하여 흡광도를 분석하는 기술이다. 가스의 종에 따라 흡수가 함께 잔존하는 다른 가스의 종 대비 흡수가 크게 일어나는 파장대역이 존재한다. 이에 따라 파장대역에 맞는 레이저 광을 측정하는 가스를 조사함으로써 빛의 흡수도를 측정하는 것이 TDLAS의 기본 측정 이론이다. 레이저 광의 입사광과 기체 분자를 통과한 투과광의 차이로 표현 가능하며, 지배방정식은 식 (1)의 Lambert-Beer 법칙으로 설명할 수 있다.

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

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

본 연구에서는 가스 농도측정을 하기 위하여 암모니아 가스의 흡광도 분석을 수행하였다. 일반적으로 누출된 NH₃ 가스는 공기 중에 함께 존재하게 된다. 공기 중 H₂O 분자가 대표적으로 흡수도가 높다. 따라서 NH₃ 흡광도만을 측정하기 위해서는 간섭도 평가가 필요하다. 본 연구에서는 HITRAN database를 이용하여 H₂O와 NH₃의 흡광도를 수치적으로 비교하기 위해 1,512 nm 영역의 파장대역을 선정하였다. Fig. 1에서 NH₃의 흡수가 크게 나타남을 확인할 수 있고 반대로 H₂O의 흡광도는 상대적으로 “0”에 가까워 1,512 nm 파장대역의 광원을 이용하면 NH₃를 위한 흡광도 분석이 가능함을 알 수 있다.

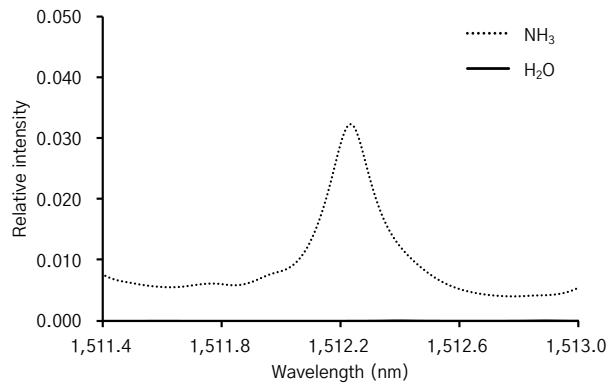


Fig. 1. Examining the interference in the theoretical absorption spectrum (1,511.4 nm – 1,513.0 nm)

NH₃ 가스는 흡입 시 승조원의 호흡기에 심각한 손상을 초래한다. 6 ppm – 20 ppm 정도만 되어도 안구 자극과 호흡기 상의 문제를 일으키며, 5,000 ppm 이상일 경우 호흡 정지로 사망하는 것으로 알려져 있다. TDLAS를 이용한 흡광도 분석에 앞서 HITRAN database를 이용해 본 연구에서 실험하고자 NH₃ 농도 100 ppm부터 300 ppm의 이론 흡광도를 Fig. 2에 나타냈다. 1,512.14 nm에서 가장 강한 흡수를 보이

며 농도가 높아짐에 따라 흡광도의 세기도 강해짐을 알 수 있다.

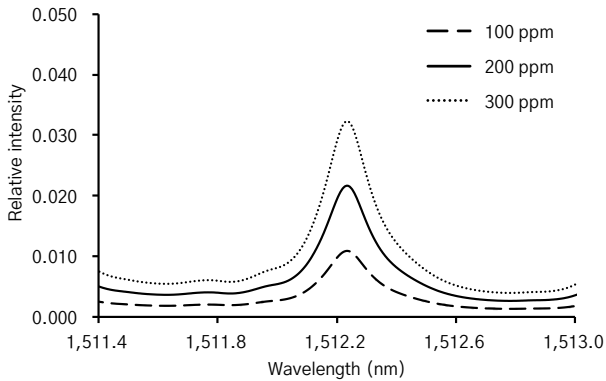


Fig. 2. Comparison of theoretical absorbance at varying ammonia concentrations

3. 가스 농도 TDLAS 측정 방법

TDLAS를 이용한 NH_3 가스의 농도별 측정 장치의 구성은 Fig. 3와 같다. NH_3 가스와 공기를 예혼합하여 농도를 100 ppm부터 300 ppm까지 50 ppm씩 상승시켜 총 5단계로 밀폐계 실험을 수행하였다.

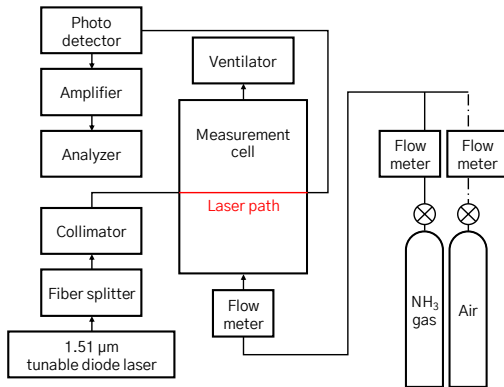


Fig. 3. Experimental setup

여기서 흡수가 일어나는 영역의 레이저 광의 길이는 6 cm이며, 측정 셀은 밀폐와 환기를 조절할 수 있는 가스 챔버 형태로 구성되어 있다. 또한 실험실의 온도는 상온으로 일반적인 환경을 구성하였으며 모든 실험의 온도 조건은 동일하게 구성하였다. 흡광도 측정을 위해 1,512 nm 인근 영역의 파장을 제공하는 DFB(distributed feedback laser) 반도체 레이저(EP1512-2-DM-B01-FA)를 이용하였다. 레이저의 파형은 1 kHz의 톱니파형을 이용하여 흡광도 분해

가 용이하게 하였다. 해당 광원은 collimator를 이용하여 가스 챔버 안으로 조사되며, 반대편에 설치된 photo detector를 이용하여 신호를 측정한다. 또한 실험에서 사용한 예혼합 가스의 유량은 MFC(mass flow controller)를 이용하여 정밀하게 제어하였다.

4. 딥러닝 다중 분류 모델을 이용한 흡광도 분석 결과

TDLAS를 이용한 분석에서 가장 중요한 작업은 실험을 통해 얻은 스펙트럼으로부터 흡광도를 분해하는 과정일 것이다. 일반적으로 흡광도 분석에는 DAS를 많이 이용하고 있으며, 무흡수 실험으로 획득한 base line을 이용하여 구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 시계열 50개의 톱니파형으로 구성된 농도별 스펙트럼을 딥러닝 다중 분류 모델을 이용하여 학습시켜 구별 성능을 검토하고자 한다. 이때 속성은 4개로 가장 흡광도가 강하게 나타난 1,512.14 nm 인근의 4 point(P1-P4)로 두어 분류 가능성을 높였다. Fig. 4는 농도별 시계열 50개의 파장의 평균 스펙트럼을 보인다.

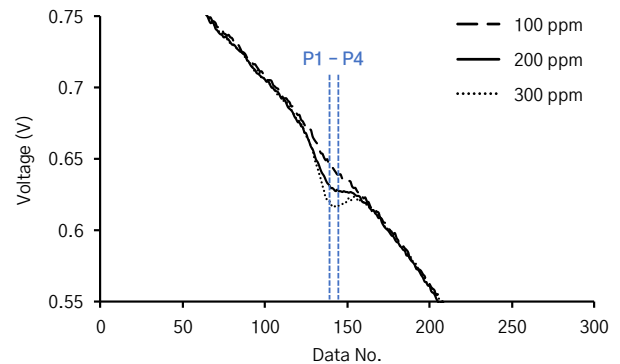


Fig. 4. Comparison of experimental spectrum at different concentrations

순수한 실험 흡수 스펙트럼에 딥러닝 다중 분류 모델을 적용하여 농도를 구분하기 위해 농도정보를 0과 1의 형태로 변환하는 one-hot-encoding을 적용하고 활성화 함수로 softmax를 적용하였다. 이에 다중 분류에 적절한 오차 함수인 categorical cross-entropy를 사용하고 최적화 함수로 adam을 적용하여 전체 샘플이 250번 반복될 때까지 수행하여 농도 값을 예측하였다. Fig. 5는 농도별 상관도 그래프를

나타낸 것으로, 1,512.14 nm 인근의 4 point(P1-P5)를 선정하였기에 학습량에 비해 분류가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

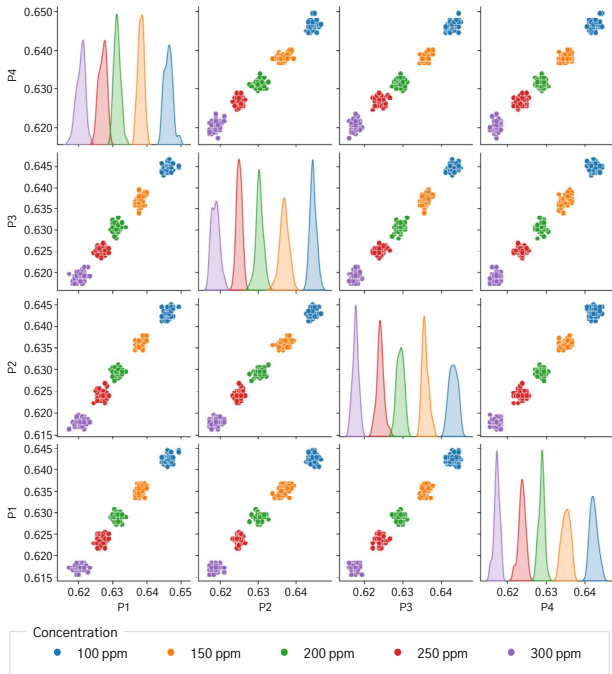


Fig. 5. Correlation graph of multi-classification for actual absorption spectrum

이때 딥러닝 다중 분류 모델의 농도 분류의 정확도는 60 %로 나타났다. 또한 본 연구에서는 흡수 실험과 무흡수 실험의 톱니파형의 강도를 동일한 크기로 정규화(normalization)하여 DAS를 적용한 NDAS(normalization direct absorption spectroscopy)를 제안하며 흡광도 결과는 Fig. 6와 같다.

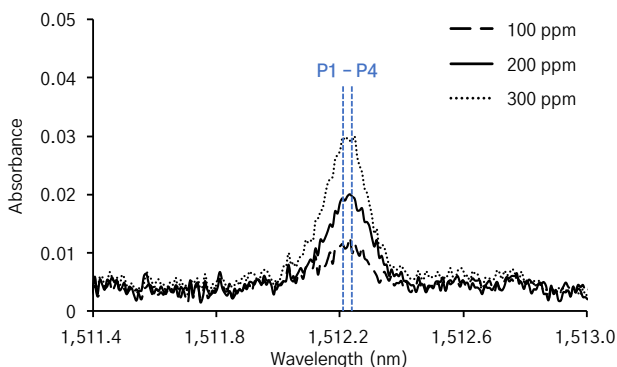


Fig. 6. Absorbance at varying concentrations using NDAS

동일한 모델을 이용하여 NDAS로 재구성한 흡광도 그래프에서 1,512.14 nm 인근의 4 point를 선정하

여 학습한 결과는 Fig. 7과 같다. 이때 딥러닝 다중 분류 모델의 농도 분류의 정확도는 97.6 %로 나타났다.

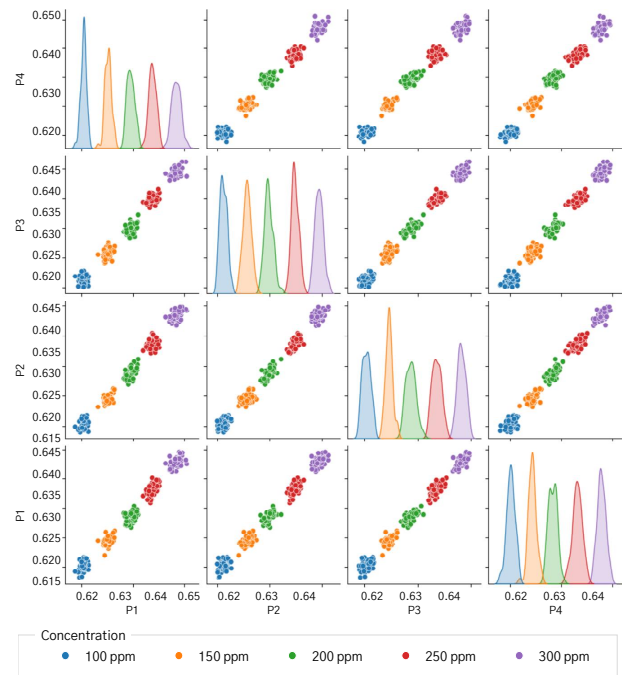


Fig. 7. Correlation graph of multi-classification for absorbance using NDAS

5. 결론

본 연구는 친환경 선박의 대체 에너지원으로 사용될 NH₃ 가스의 누출 사고를 방지하기 위한 가스 누출 농도측정에 관한 연구를 수행하였다. 작업자가 직접적으로 접근하기 힘든 상황을 고려하여 비접촉식 광학 측정법인 TDLAS를 이용하였으며 농도 측정 결과의 정밀도 향상을 위해 기존의 DAS를 개선한 NDAS를 이용하였다. 또한 실험 스펙트럼으로부터 흡광도를 분해하기 전과 NDAS를 이용하여 흡광도를 구한 후 딥러닝 다중 분류 모델을 적용하여 농도 분류의 타당성을 평가하였다. 그 결과 단순히 실제 스펙트럼을 이용하였을 경우는 정확도가 60 %였으며, NDAS를 이용한 결과는 97.6 %로 매우 높게 나타났다. 따라서 가스의 농도평가에 있어 NDAS의 이용이 매우 유리함을 확인할 수 있다.

참고문헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Z. Han, B. Wei, Y. Zheng, Y. Yin, K. Li, S. Li, “Breast Cancer Multi-classification from Histopathological Images with Structured Deep Learning Model,” *Scientific Reports*, Vol. 7, 4172, 2017.

[10] G. Aceto, D. Ciunzio, A. Montieri, A. Pescapé, “Multi-classification Approaches for Classifying Mobile App Traffic,” *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 103, No. 1, pp. 131–145, 2018.

[11] E. Irmak, “Multi-Classification of Brain Tumor MRI Images Using Deep Convolutional Neural Network with Fully Optimized Framework,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, Vol. 45, pp. 1015–1036, 2021.