



Received: 2026/08/02
Revised: 2026/08/16
Accepted: 2026/09/11
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Min-Gyu Jeon

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5335
E-mail: mgjeon@navy.ac.kr

1차원 컨볼루션 신경망을 이용한 TDLAS 기반 온도 예측

Temperature Prediction Using a One-Dimensional Convolutional Neural Network Based on TDLAS

전민규*

해군사관학교 기계시스템공학과 부교수

Min-Gyu Jeon*

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

Abstract

환경 모니터링, 연소 진단 및 공정 제어를 위한 비접촉식 온도 측정의 정확도 향상을 위해 TDLAS 기반 1D-CNN 모델을 제안하였다. H₂O 흡수 스펙트럼의 대표 특징점 5개와 Gaussian noise(5%) 기반 데이터 증강을 적용하였으며, 기존 다항식 피팅 기법보다 잡음 환경에서 우수한 온도 예측 정확도와 강건성을 확인하였다.

To improve non-contact temperature measurement accuracy, a one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN) based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is proposed. Five representative features extracted from H₂O absorption spectra were employed as the model inputs, and Gaussian noise (5%)-based data augmentation was applied to improve generalization. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves higher temperature prediction accuracy and robustness under noisy conditions compared with the conventional polynomial spectrum-fitting method.

Keywords

가변파장 반도체 레이저 흡수분광법(TDLAS), 온도 예측(Temperature Prediction), 1차원 컨볼루션 신경망(1D-CNN), 데이터 증강(Data Augmentation)

Acknowledgement

이 논문은 2026년 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

1. 서론

환경 모니터링, 연소 진단, 공정 제어 등 산업 여러 분야에서 온도 측정 기술 [1-3]은 필수적 사항이다. 실사용 환경에 따라 비접촉식 측정이 요구되며 흡수 분광법은 레이저 기반 기술로 높은 감도와 빠른 응답 속도로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 주변 기기나 외부 환경이 열악한 경우 측정 데이터에 잡음의 영향을 많이 받게 된다. 기존에는 비선형 스펙트럼 피팅이나 단순화된 특징 추출로 복잡한 스펙트럼과 온도와의 상관관계를 제대로 추출하지 못하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 광학식 스펙트럼 기술 중 하나인 가변 파장 반도체 레이저 흡수 분광법(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)[4-10]을 이용하여 흡수 분광 측정의 정확성과 견고성을 향상시키기 위해 1차원 컨볼루션 신경망(one-dimensional convolutional neural network, 1D-CNN)[11-13]을 이용한 딥러닝 기반 온도 예측 모델을 제안하고자 한다. 제안된 모델은 스펙트럼 흡광도 특징과 온도 사이의 비선형 매칭을 직접 학습하고 컨볼루션 레이어는 온도에 따른 흡수 특성과 관련된 국부적인 특징을 효과적으로 추출하여 잡음의 영향을 억제하여 개선하고자 한다. 일정한 압력과 온도를 유지할 수 있는 특수 챔버를 활용하여 H₂O 가스를 측정 대상으로 한 TDLAS 흡수 스펙트럼을 100~500°C 구간의 5단계에서 취득하고, 대표 특징점 5개를 입력으로 사용하였다. 또한 실제 실험 스펙트럼을 Gaussian noise 5%를 적용하여 확장하였다. 제안하는 1D-CNN 모델은 실험적으

로 얻은 스펙트럼 데이터 셋을 사용하여 학습 및 검증을 하였으며 기존 특징점에 대한 다항식 스펙트럼 피팅의 결과와 비교분석을 하였다. 딥러닝 1D-CNN 모델을 활용하여 잡음이 있는 환경에서 우수한 예측 정확도를 달성하여 실시간 고정밀 온도 감지를 위한 기술을 제안하고자 한다.

2. 흡수분광학 온도측정 이론

온도측정 기술에는 다양한 방식들이 있으며 대표적으로 열전대, 적외선 온도계 등이 있다. 고온 공정과 같이 직접적인 센서 장착이 어려운 영역에는 비접촉식 계측 방안이 요구된다. 본 연구에서는 비접촉 광학 측정 방식인 TDLAS를 H₂O 가스의 온도측정에 적용하였다. TDLAS는 흡수 분광학 기법으로서 측정 대상 기체에 특정 파장 대역의 레이저를 선택적으로 조사하여 기체 분자가 흡수하는 빛의 세기를 측정하여 온도와 농도 같은 물리량을 추정하는 방식이다. 특히 H₂O 가스는 근적외선 영역인 1365 nm 부근에서 강한 흡수 반응을 보이며 흡광도의 세기 변화는 기체의 온도 변화에 민감하게 변화하는 특성을 가진다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 흡수 스펙트럼 분석을 통해 기체의 온도를 비접촉 방식으로 측정할 수 있다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 1365 nm 파장대역의 H₂O 가스의 온도 변화에 따른 상대 강도 변화를 보인다. 해당 파장 대역에서는 H₂O 가스의 흡수 특성으로부터 온도를 정밀하게 추정할 수 있다. TDLAS에서 흡광도는 입사광과 투과광의 차이로부터 계산되며 식 (1)의 Lambert-Beer 법칙에 따른다.

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

여기서, I_{tr} : 투과광,

I_{in} : 입사광,

A_{λ} : 흡광도,

P : 압력,

n_i : 종밀도,

L : 측정 길이,

$S_{i,j}$: 선강도,

$G_{vi,j}$: 흡광도.

일반적으로 TDLAS 기반 온도 측정에는 Lambert-Beer 법칙과 분광 데이터베이스(Hitran database)를 이용한 비선형 스펙트럼 피팅을 이용하여 온도를 추정한다. Fig. 2는 온도 변화에 따라 흡수가 강한 특정 5개 지점(#1-5)에 대하여 나타낸다. 각

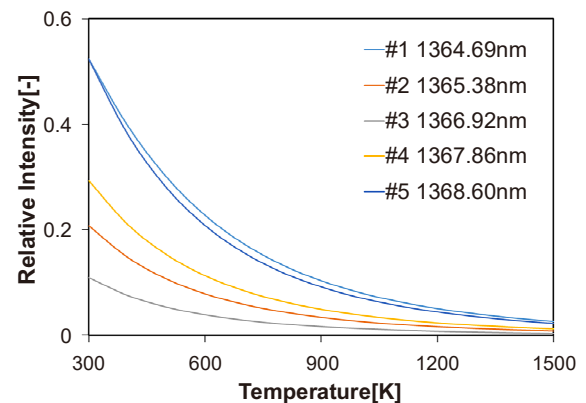


Fig. 2. Temperature dependence of the relative H₂O absorbance intensity at 1365 nm

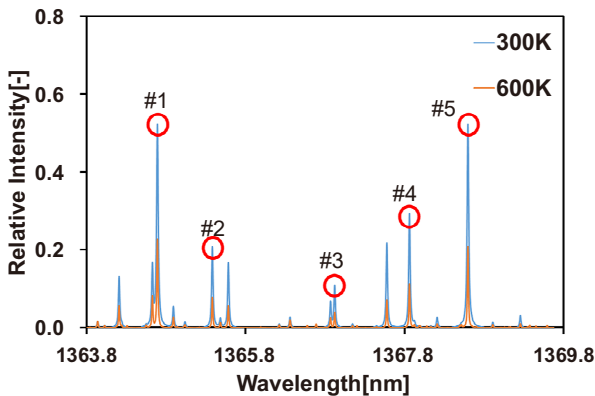


Fig. 1. Relative intensity of H₂O at different temperatures (0.1 MPa)

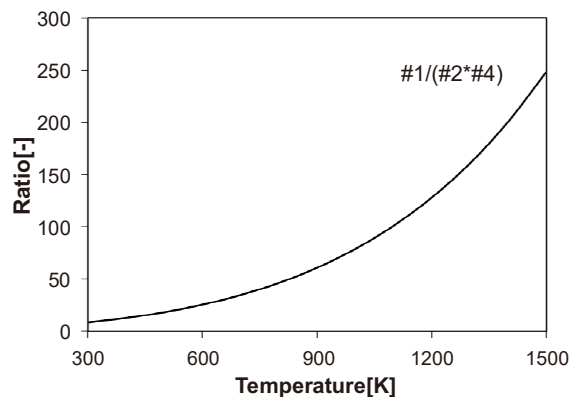


Fig. 3. Temperature estimation using the relative intensity ratio

지점마다의 변화를 온도 추정 다항식 스펙트럼 피팅을 하기 위해 $\#1/(\#2*\#4)$ 관계를 이용하여 Fig. 3와 같이 ratio 그래프를 구할 수 있다.

3. 딥러닝 온도 예측

3.1 특수 챔버를 이용한 가스 흡광도 측정

본 연구에서 활용한 딥러닝 데이터 셋을 구축하기 위해 특수 챔버를 이용하여 H_2O 가스의 온도 변화에 따른 흡광도를 측정하였다. 1,365 nm 파장대역의 레이저를 H_2O 가스 농도 2.6%로 제한하여 밀폐 상태를 유지할 수 있는 특수 챔버에 조사하여 온도를 100°C(373.15K)~500°C(773.15K)로 단계별 100°C 증가, 5단계 변화에 따른 흡광도를 측정하였다. 압력은 0.1 MPa로 동일하게 제한하였으며 흡광도 재구성에는 직접 흡수 분광법(direct absorption spectroscopy, DAS)를 적용하였다. Fig. 4는 100°C, 300°C, 500°C일 때 흡광도를 보인다.

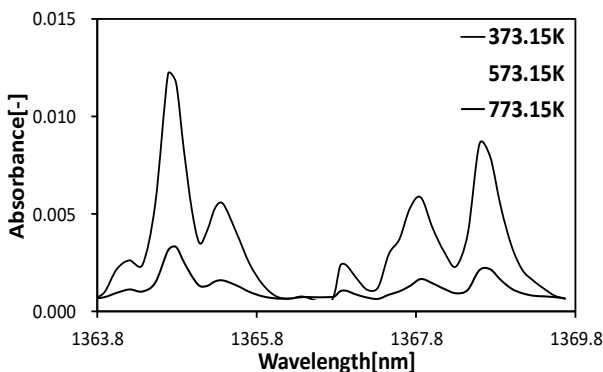


Fig. 4. H_2O absorbance versus temperature

3.2 1D-CNN을 이용한 온도 예측

본 연구에서는 TDLAS를 이용하여 획득한 흡광도 데이터를 활용하여 온도를 예측하기 위해 1D-CNN을 사용했다. 입력 특징은 온도 변화에 가장 민감하게 반응한 $\#1-5$ 지점의 값으로 구성하였다. CNN 방식은 인접한 스펙트럼 특징간의 국소적 상관관계를 포착하도록 설계되었다. 온도에 따른 클래스 라벨은 100T, 200T, 300T, 400T, 500T의 문자열 형태임으로 정수형 인코딩 후 다중 클래스 분류를 위해 원-핫 인코딩을 적용하였다. 모델은 두 개의 합성곱 레이어

와 과적합을 방지하기 위해 max-pooling 레이어 및 dropout 레이어로 구성하였다. 추출된 특징은 회귀 분석을 수행하였다. 1D-CNN모델은 평균 제곱 오차(mean squared error, MSE)를 사용하여 학습되었고, Adam optimizer를 이용하여 최적화하였다. 또한 재현성 확보를 하기 위해 학습 과정에서 random seed를 고정하였다.

3.3 가우시안 노이즈를 이용한 데이터 증강

모델의 강건성과 일반화 성능을 향상시키기 위해 실험 데이터 셋에 Gaussian noise를 이용하여 데이터를 증강하였다. 연소와 같은 고온 환경에서는 스펙트럼 신호에 잡음이 혼입되는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 5% Gaussian noise를 추가하여 데이터를 증강하여 전체 데이터의 80%는 학습용, 20%는 평가용으로 활용하였다.

4. 1D-CNN모델의 온도 예측 평가 검토

본 연구에서 제안하는 1D-CNN 모델의 효과를 평가하기 위해 기존의 다항식 스펙트럼 피팅 방법과 온도 예측 성능을 비교 평가하였다. Fig. 5는 1D-CNN 학습 셋으로 사용한 전체 데이터에 대하여 다항식 스펙트럼 피팅을 하였을 경우 $\text{Ratio}(\#1/(\#2*\#4))$ 의 값으로 추정치와 실제 온도와의 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE)는 식 (2)로 평가한 결과 44.59K로 평가되었다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |MT_i - PT_i| \quad (2)$$

여기서, MT : 측정된 실제 온도,

PT : 모델이 예측한 온도,

N : 전체 평가 데이터의 수

1D-CNN 모델을 활용하여 온도 예측을 수행한 결과, 학습 MAE는 30.61K, 평가 MAE는 34.93K로 평가되었다. 특히 학습을 수행하며 온도 예측의 성능을 온도별 혼동 행렬(confusion matrix)로 검토한 결과 Fig. 6와 같이 대부분의 온도 수준을 효과적으로 구분함을 알 수 있다. 하지만 상대적 고온 영역인

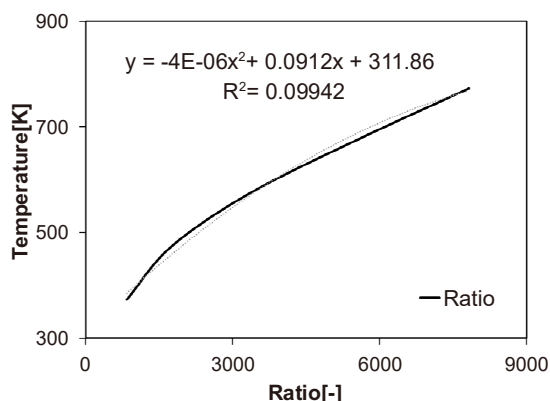


Fig. 5. Temperature prediction using polynomial spectrum fitting

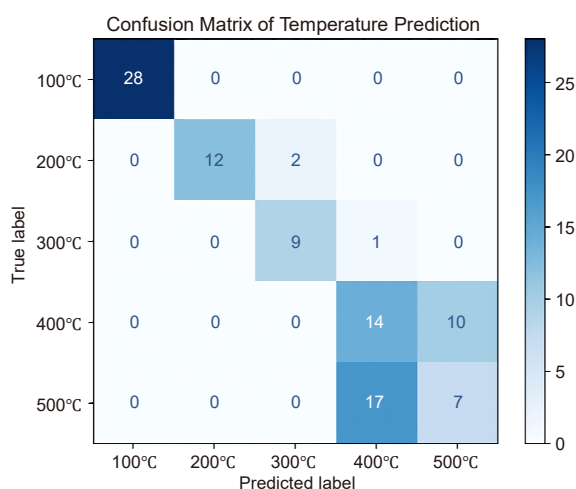


Fig. 6. Confusion matrix of the deep learning model

400°C(373.15K), 500°C(773.15K)에서 오분류도가 높게 평가되었다. 1D-CNN모델이 다항식 스펙트럼 피팅에 비해 MAE가 약 10K만큼 온도 예측 성능이 높음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 TDLAS 기반 H₂O 흡수 스펙트럼을 이용하여 딥러닝 모델 중 하나인 1D-CNN모델을 이용하여 온도 예측 모델을 제안하였다. 일정한 압력과 온도를 유지할 수 있는 특수 챔버에서 100~500°C구간의 H₂O 흡수 스펙트럼을 이용하여 흡광도가 높은 대표 5개 지점을 입력 변수로 활용하였다. 또한 주변 기기나 외부 환경이 열악한 잡음 환경에서 일반화 성능과 강건성을 확보하기 위해 Gaussian noise(5%)를 이용하여 데이터 증강을 수행하였다.

제안한 1D-CNN모델의 성능은 기존 다항식 스펙

트럼 피팅 기법과 비교하여 온도 예측 성능을 평가하였다. 평가 결과 1D-CNN 모델은 학습 데이터와 평가 데이터에서 모두 낮은 MAE 값을 보여주어 기존 방법보다 우수한 온도 예측 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 이는 컨볼루션 연산을 통해 국부적인 스펙트럼 특징을 효과적으로 추출하여 흡수 스펙트럼과 온도와 의 복잡한 비선형 관계를 학습함으로써 기존 수학적 피팅 방식의 한계를 극복할 수 있음을 시사한다. 또한 혼동 행렬을 이용한 분석 결과 대부분의 영역에서 정확하게 온도를 분류하였으며 일부 고온 영역에서 오분류도가 나타났다. 이는 인접한 온도에서 유사한 흡수 스펙트럼 특징을 가지는 현상으로 판단되며 실제 예측 오차는 크지 않았으므로 제안한 1D-CNN 모델이 높은 온도 예측 성능을 유지한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 1D-CNN 모델은 환경 모니터링, 연소 진단과 같은 산업 전반에 걸쳐 잡음이 존재하는 실제 환경에서도 실시간 비접촉식 온도 측정을 위한 도구로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. V. Heitor & A. L. N. Moreira, 'Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies,' *Progress in Energy and Combustion Science*, VOL. 19, NO. 3, 1993, pp. 259-278.
- [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, NO. 5, 2004, pp. 399-411.
- [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, 2012, pp. 157-167.
- [4] Min-Gyu Jeon & Gyeong-Rae Cho, 'A Study on Continuous Temperature Measurement Using Direct Absorption Spectroscopy for Fuel-Air Premixed Flames,' *Journal of Mechanical Science and Technology*, VOL. 37, 2023, pp. 4109-4116.
- [5] Min-Gyu Jeon, Jeong-Woong Hong, Deog-Hee Doh, & Yoshihiro 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. 07n09, 2020, Article 2040020.
- [6] Min-Gyu Jeon, Deog-Hee Doh, & Yoshihiro 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, 2019, Article 4955.

[7] Min-Gyu Jeon, Yoshihiro Deguchi, Takahiro Kamimoto, Deog-Hee Doh, & Gyeong-Rae Cho, 'Performances of New Reconstruction Algorithms for CT-TDLAS (Computer Tomography-Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy),' Applied Thermal Engineering, VOL. 115, 2017, pp. 1148-1160.

[8] M. Arshad Zahangir Chowdhury & Matthew A. Oehlschlaeger, 'Deep Learning for Gas Sensing via Infrared Spectroscopy,' Sensors, VOL. 24, NO. 6, 2024, Article 1873.

[9] Simardeep Kaur, Naseeb Singh, Amit Kumar, W. S. Philanim, Veerendra Kumar Verma, Amit Kumar Patil, Rakesh Bhardwaj, Amritbir Riar, 'Evaluating the Impact of Hyperparameters on the Performance of 1D CNN Model for Nutritional Profiling of Underutilized Crops Using NIRS Data,' Smart Agricultural Technology, VOL. 11, 2025, Article 101025.

[10] Min-Gyu Jeon, 'A Study on Monitoring OH Radicals

Using Optical Measurement Techniques,' Journal of the KNST, VOL. 8, NO. 3, 2025, pp. 523-526.

[11] Jeong-Woong Hong, Sung Hwan Yoon, & Min-Gyu Jeon, 'A Study on Baseline Selection for Ammonia Concentration Measurement Using TDLAS,' Journal of Mechanical Science and Technology, VOL. 39, NO. 3, 2025, pp. 1255-1261.

[12] 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, 2015, pp. 51-57.

[13] Doo-Won Choi, Min-Gyu Jeon, Gyeong-Rae Cho, Takahiro Kamimoto, Yoshihiro Deguchi, & Deog-Hee Doh, 'Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS),' Journal of Thermal Science, VOL. 25, NO. 1, 2016, pp. 84-89.