

화학발광을 이용한 화염 계측 및 인공지능 기반의 당량비 예측

신상훈^{*,1}, 권민준^{**,2}, 김세원^{**,3}, 소홍윤^{*,†}

^{*}한양대학교 융합기계공학과, ^{**}한국생산기술연구원, [†]한양대학교 나노과학기술연구소

¹sshoon@hanyang.ac.kr, ²mjk@kitech.re.kr, ³swkim@kitech.re.kr [†]hyso@hanyang.ac.kr

Equivalence ratio prediction by using artificial intelligence and flame chemiluminescence detection

Sanghun Shin^{*,1}, Minjun Kwon^{**,2}, Sewon Kim^{**,3}, Hongyun So^{*,†}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

^{**}Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

[†]Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University

요약

본 논문은 화염의 당량비를 예측하기 위하여 화학발광을 활용한 연소계측과 데이터 기반의 인공지능 회귀모델을 활용한 연구에 관한 것이다. 화염의 상태를 모니터링 하기 위해 화염의 화학발광을 이용한 광계측을 수행하였으며, 과장 영역 중 OH^{*}, CH^{*}, C₂^{*}에 해당하는 영역대의 광계측을 수행하였다. 이로부터 다양한 당량비에 해당하는 데이터셋을 획득하였으며, 머신러닝/딥러닝 모델을 적용하여 데이터 기반의 회귀 모델을 다양한 파라미터를 활용하여 학습하고 비교하였다. 결과적으로, 실시간으로 얻어지는 라디칼 광계측 데이터를 입력신호로 활용하고 학습된 모델을 활용하여 높은 정확도의 화염의 당량비 예측 가상 센싱 기술을 개발하였다.

I. 서론

화염의 상태를 모니터링하는 중요한 지표 중 하나인 당량비는 연료와 공기의 비율에 따라서 결정된다[1-3]. 따라서 온실가스 및 유해가스 저감과 안정적인 연소제어를 위한 실시간 당량비 모니터링 기술이 다양하게 연구되어 왔다. 본 연구에서는 연소 시 특정 라디칼로 인하여 발생하는 화학 발광을 이용한 비접촉 화염 계측 방식을 통하여 데이터를 획득하고, 머신 러닝 기반의 회귀모델을 활용하여 당량비를 예측하는 방법을 소개하고자 한다. 또한 모델 종류 비교 및 하이퍼파라미터튜닝을 통해 정확도를 향상시켰다. 본 연구에서 개발된 화염의 실시간 당량비 예측 모델은 향후 최적 연소 시스템에 적용하여 에너지 소비 효율 향상과 나아가 탄소중립에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 데이터 수집 및 알고리즘 학습 결과

연소 시스템을 구성하기 위해 난류확산화염 연소기를 포함한 연소로와, 공기와 LPG 연료의 유량 공급 시스템을 구성하였다. 또한, 화염 계측을 위해 광파이버를 활용하여 화염의 자발광을 집광하였으며, OH^{*}, CH^{*}, C₂^{*} 라디칼 계측을 위한 PMT 시스템을 활용하여 실시간으로 데이터를 측정하였다. 측정 조건의 경우, 당량비의 역수인 공기과잉률을 1.0 ~ 1.8 까지 변경해가며 데이터를 획득하였으며 3 초씩 측정하여 총 2160 개의 데이터셋을 구축하였다. 이후 training dataset 으로 1512 개, validation 과 test dataset 으로 각각 324 개로 분할하여 인공지능 모델을 학습시켰다.

Regression 모델의 경우 Linear regression (LR), k-nearest neighbor (kNN), Deep neural network (DNN)을 선정하여 학습을 수행하였다. DNN 모델의 경우 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 과적합 없이 학습 진행에 따라서 loss 가 감소하며 수렴하는 경향을 검증하였다. 또한, 모델 종류에 따라 공기과잉률 예측 성능을 비교하면 LR 의 오차가 가장 크며, DNN 이 kNN 에 비해서 더 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 특히 LR 과 비교하여 Mean absolute error (MAE)의 경우

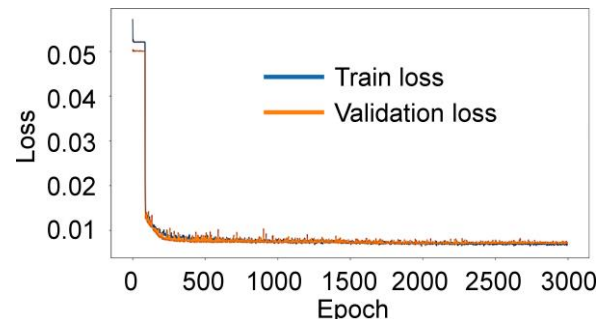


Figure 1. Epoch에 따른 학습 예시

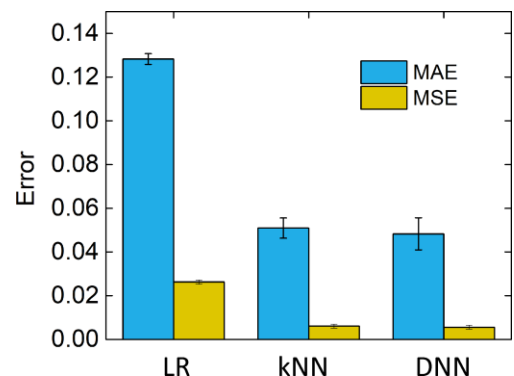


Figure 2. 모델 종류에 따른 오차 비교

62.37%, Mean squared error (MSE)의 경우에는 78.63% 감소한 성능을 나타내었다.

III. 결론

본 연구에서는 연소기에서 발생하는 화염의 당량비를 예측하기 위해 다양한 당량비 범위에 따라 비접촉 광계측 방식을 활용하여 라디칼 측정 데이터셋을 획득하였다. 이때 얻어진 데이터를 기반으로 LR, kNN, DNN 의 머신러닝/딥러닝 모델을 활용하여 작은 오차에서 공기과잉률 및 당량비를 예측하는데 성공하였다. 특히, 테스트 데이터셋을 활용한 모델 평가에서, LR 모델에 비해 DNN 모델의 경우 평균오차와

평균제곱오차를 각각 62.37%, 78.63% 만큼 감소된 결과를 나타내었다. 이는 향후 최적 연소제어에 활용하여 당량비를 예측할 수 있는 가상 센싱 기술로, 미래 탄소중립 실현에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20202000000010).

참 고 문 헌

- [1] F. Li, Z. Cao, L. Xu, Y. Xie, Prediction of equivalence ratio in pulse combustor from ion current amplitude spectrum, *Fuel*. 218 (2018) 179–187.
- [2] M. Vogel, M. Bachfischer, J. Kaufmann, T. Sattelmayer, Experimental investigation of equivalence ratio fluctuations in a lean premixed kerosene combustor, *Exp. Fluids*. 62 (2021) 93.
- [3] J. Lee, B. McGann, S.D. Hammack, C. Carter, T. Lee, H. Do, M.S. Bak, Machine learning based quantification of fuel-air equivalence ratio and pressure from laser-induced plasma spectroscopy, *Opt. Express*. 29 (2021) 17902.