

가스의 광 흡수 특성 분석을 통한 대형 연소시스템 내 실시간 온도 및 농도 측정에 관한 실증 연구

박지연*, **, 소성현*, ***, 박대근*, 류창국****, †이창엽*, †유미연*

*한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부, **성균관대학교 기계공학과 석박사통합과정,
연세대학교 기계공학과 박사과정, *성균관대학교 기계공학과 교수
(2020년 7월 23일 접수, 2020년 9월 26일 수정, 2020년 9월 27일 채택)

An Empirical Study on Real-Time Temperature and Concentration Measurement Through Optical Absorption Characteristic Analysis of Gas in a Large Combustion System

Jiyeon Park*, **, Sunghyun So*, ***, Daeguen Park* ·
Changkook Ryu** · †Changyeop Lee* · †Miyeon Yoo*

*Thermochemical Energy System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology,
Chungnam, 31056, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi, 16419, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

(Received July 23, 2020; Revised September 26, 2020; Accepted September 27, 2020)

요 약

산업현장의 대형 연소시스템 내부의 온도 및 농도를 실시간으로 정밀하게 측정하는 일은 그 규모 및 환경 조건으로 인해 사실상 어렵다. 현재 주로 사용되고 있는 열전대를 이용한 온도 측정은 점 측정 방식으로 대형 연소시스템 내부 광역 범위의 온도 분석에 적용하기에는 정밀성과 신뢰성이 낮으며, 접근성에 한계가 있다. 농도 분석 측면에서 대부분의 측정 방법은 샘플링 방식으로 실시간 측정이 어렵고 대표성에 한계가 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위한 방법으로, 레이저를 이용한 측정법이 지속적으로 개발되고 있다. 레이저 기반 측정법들은 선 평균 측정 방식으로 대표성과 정밀도가 뛰어나 대형 연소시스템 적용에 유리하다. 본 연구에서는 파장 가변형 레이저 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)을 통해 연소 시에 발생하는 수증기와 산소를 이용하여 실시간으로 온도 및 농도를 측정하였다. 측정 결과 연소시스템 내부 평균 온도는 1330℃, 평균 산소 농도는 3.3%로 발전소 데이터와 비교하였을 때 유사한 경향성의 측정값을 얻었다.

Abstract - It is practically difficult to accurately measure the temperature and concentration of a large combustion systems at industrial sites in real time. Temperature measurement using thermocouple, which are mainly used, is a point-measuring method that is less accurate and less reliable to analyze the wide area range of inner combustion system, and has limitations to internal accessibility. In terms of concentration analysis, most measurement methods use sampling method, which are limited by the difficulty of real-time measurement. As a way to overcome these limitations, laser-based measurement methods have been developed continuously. Laser-based measurement are line-average measurement methods with high representation and precision, which are beneficial for the application of large combustion systems. In this study the temperature and concentration were measured in real time by water vapor and oxygen generated during combustion using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

†Corresponding author: cylee@kitech.re.kr, myyoo@kitech.re.kr

(TDLAS). The results showed that the average temperature inside the combustion system was 1330°C and the mean oxygen concentration was 3.3 %, which showed similar tendency with plant monitoring data.

Key words : tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS), combustion system, water vapor, oxygen, temperature, gas concentration

I. 서 론

국내 총 발전량 중 화력발전이 차지하는 비중은 2017년 기준 전체의 발전 에너지 비율 중 가장 높다. 화력발전은 대부분의 영역에서 높은 비중을 차지하지만 연소 과정에서 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 미세먼지 등이 발생하여 환경 문제를 일으킨다. 이러한 환경오염 배출 물질을 저감하고 연소 효율을 증대시키기 위해서는 연소 진단 및 제어가 매우 중요하다. [1]

연소 과정에서의 온도 및 가스 농도는 화염상태를 파악할 수 있는 매우 중요한 변수로, 연소 효율이나 질소산화물, 일산화탄소 발생 등 저공해 특성과 밀접한 관계가 있다. 현재 연소 시스템 내부 온도를 측정하기 위해서 열전대(Thermocouple)를 사용하는데, 이는 점계측 방식으로 연소 시스템 내부 전체의 온도를 반영하기에는 부족하고, 대형 연소시스템에서는 벽면 인근의 온도 측정만 가능하여 대표성이 떨어진다. 또한, 측정 온도에 도달하는 시간이 필요하며, 수명이 짧아 잦은 교체가 필요하다. [2]

연소 가스 중에 산소(O₂) 농도는 에너지 효율과 연관되어 일반적으로 모니터링 되는 요소이다. 이러한 산소(O₂)의 농도를 측정하기 위해 일반적으로 전기화학식(Electrochemical) 센서를 이용하는데, 이는 샘플링(Sampling) 방식으로 실시간으로 측정이 불가능하며, 점 측정 방식으로 전체 산소 농도를 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다. [3]

이러한 기존의 측정 방법들의 한계점을 극복하기 위한 방법으로 레이저 흡수 분광법(Laser Absorption Spectroscopy)을 이용한 연소 진단법이 발전되고 있다. 그중에서도 파장 가변형 레이저 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)은 연소 시스템의 온도 및 기타 중요 가스 농도를 측정하는데 있어서 현장 적용성이 우수하며 상용화에 대한 기대가 높다.

TDLAS를 이용한 측정 방법은 응답시간이 빠르며, 신뢰성이 높고 온도와 농도 등 다양한 변수에 대하여 측정이 가능하다. 또한, 레이저 빛이 지나가는 경로에 대한 선 평균 계측 방식으로 점 계측 방식보다 대표성

이 우수하다. 또한 각 가스마다 특정 파장 영역의 빛을 흡수하는 원리를 이용하는 방식으로 다양한 가스가 존재하는 상황에서도 특정 가스만 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. [4]

본 연구에서는 TDLAS 기법을 적용하여, 연소 시스템 내부에 다량으로 존재하는 수증기 계측을 통해 실시간 온도를 도출하였다. 또한 연소 시스템 내부의 산소 농도를 측정하였으며, 이를 바탕으로 실제 발전소 배기가스 후단 산소 농도 데이터와 경향성을 비교 분석하였다. [2-5]

II. 이 론

본 연구에서 연소 시스템 온도 및 산소 농도를 측정하기 위해 사용된 TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 방법은 Beer-Lambert 법칙을 기반으로 한다. Beer-Lambert 법칙은 TDLAS 등 흡수 분광법을 기반으로 하는 측정 방법들의 가장 기본적인 원리이다. 일반적인 흡수 분광법을 도식화하여 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

측정하고자 하는 가스의 흡수가 일어나는 특정 파장영역의 레이저 빛을 가스에 조사하면 레이저 빛이 가스를 투과하며 흡수가 일어나게 된다. 이때의 흡수면적을 계산하여 가스의 농도 및 온도를 구할 수 있다. 이를 Eq.(1)과 같이 나타낼 수 있다. [6]

$$T_v = \left(\frac{I}{I_0} \right)_v = \exp(k_v \cdot L) \quad (1)$$

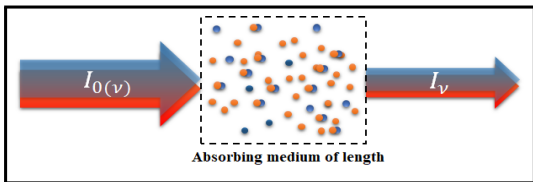


Fig. 1. Schematic of typical absorption spectroscopy measurements

여기서 I_0 는 측정하고자 하는 가스를 투과하기 전 레이저의 강도, I 는 투과 후 레이저 강도이며, L 은 레이저가 투과한 거리이다. 여기에서 k_ν 는 흡수 계수 (Spectral absorption coefficient)이며, Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다. [6]

$$k_\nu = P \sum_{j=1}^k X_j \sum_{i=1}^{N_j} S_{i,j}(T) \Phi_{i,j}(\nu - \nu_{0,i}) \quad (2)$$

여기에서 X_i 는 측정 대상 매질의 물분율, $P(\text{atm})$ 은 매질 내 정적 압력, $\sum_{i=1}^{N_j} S_{i,j}(T)$ 는 $T(\text{K})$ 온도에서 해당 분자의 특정 파장에 존재하는 선강도(Linestrength), $\Phi_{i,j}$ 는 흡수 면적 profile을 나타내는 선형 함수이다.

Eq. (1)에서 $k_\nu \cdot L$ 은 흡광도(Spectral absorbance, a_ν)로 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. [6]

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_\nu = \exp\left(-P \sum_{j=1}^k X_j \Phi_{i,j}(\nu - \nu_{0,i}) \sum_{i=1}^{N_j} S_{i,j}(T)L\right) \equiv \alpha_\nu \quad (3)$$

흡수 면적 profile의 선형 함수 $\Phi_{i,j}$ 는 $\int \Phi_\nu(\nu - \nu_{i,0})d\nu = 1$ 로 정규화(Normalization)되며, 최종적으로 아래의 Eq. (4)로 나타낼 수 있다. [6]

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_\nu d\nu = P \int_0^L X_i(x) S_i[T(x)] dx \quad (4)$$

여기에서 흡광도의 면적(A) 값을 간단하게 Eq. (5) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = P X_{abs} S_i(T) L \quad (5)$$

이를 바탕으로 특정 가스의 온도 값을 유도할 수 있다. 기체의 온도는 두 흡수선의 흡광도 면적의 비로 결정된다.

$$\begin{aligned} R &= \frac{A_1}{A_2} = \frac{\int P_{abs} L \Phi_{\nu_1} S_1(T) d\nu}{\int P_{abs} L \Phi_{\nu_2} S_2(T) d\nu} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} \\ &= \frac{S(T_0, \nu_1)}{S(T_0, \nu_2)} \exp\left[-\frac{hc}{k}(E''_1 - E''_2)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

유도한 위의 Eq. (6)을 바탕으로 (7)와 같이 온도의 관한 식을 정의할 수 있다.

$$T = \frac{\left(\frac{hc}{k}\right)(E''_2 - E''_1)}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \ln\left(\frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}\right) + \left(\frac{hc}{k}\right)\left(\frac{E''_2 - E''_1}{T_0}\right)} \quad (7)$$

농도를 분석하기 위해서는 하나의 광 흡수 신호가 필요하다. Eq. (3)에서 간단하게 유도하여 Eq. (8)과 같이 농도를 구하는 식을 나타낼 수 있다. [7]

$$X = \frac{A}{P \cdot L \cdot S(T)} \quad (8)$$

여기에서 $S(T)$ 에 해당하는 값은 농도를 분석하기 위해 사용하는 가스 분자의 물리적 특성인 선강도 값으로, HITRAN Database를 통해서 얻을 수 있다. [8]

본 연구에서는 Eq. (7), (8)을 토대로 연소시스템 내 수증기(H_2O)와 산소(O_2)를 이용하여서 온도 및 농도 측정을 진행하였다.

III. 실험 방법 및 장치

3.1. 수증기(H_2O)와 산소(O_2) 파장 선정

본 연구에 앞서 TDLAS 기법을 적용하여 내부 수증기(H_2O)와 산소(O_2)를 이용하여 온도 및 농도를 측정하기 위하여 정확한 파장을 선정하는 것이 중요하다. 측정하고자 하는 환경인 연소 시스템 내부의 고온 환경을 고려하며 다른 가스 분자들과의 간섭이 없으면서 선강도 값이 높은 파장을 선정하는 것이 측정에 유리하다.

Fig. 2는 HITRAN Database를 기반으로 하여 0 - 10 μm 영역에서의 다양한 가스 분자들의 흡수가 일어나는 영역을 나타낸 그래프이다. [8]

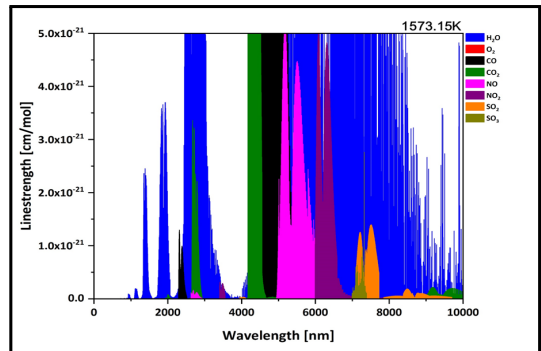


Fig. 2. Gas absorption in the 0 - 10 μm area

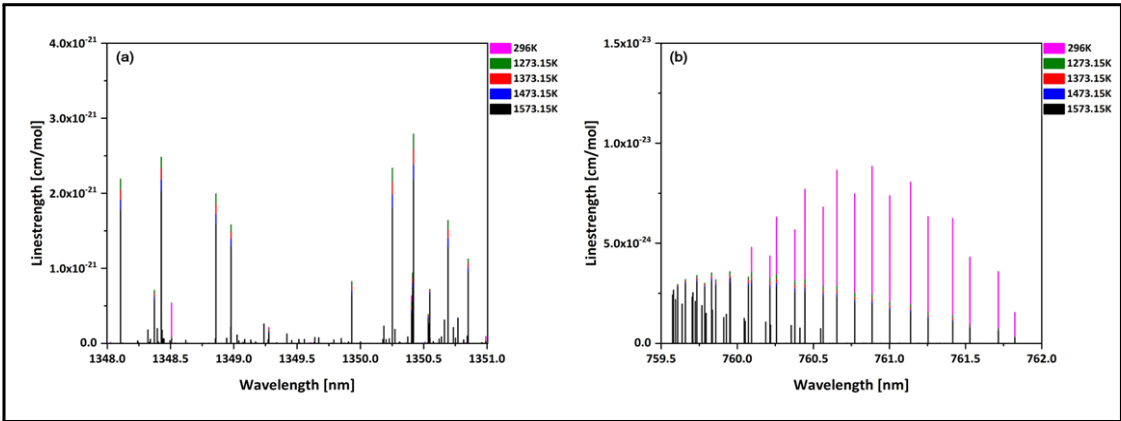


Fig. 3. (a) Linestrength of water vapor(H₂O) (b) Linestrength of oxygen(O₂)

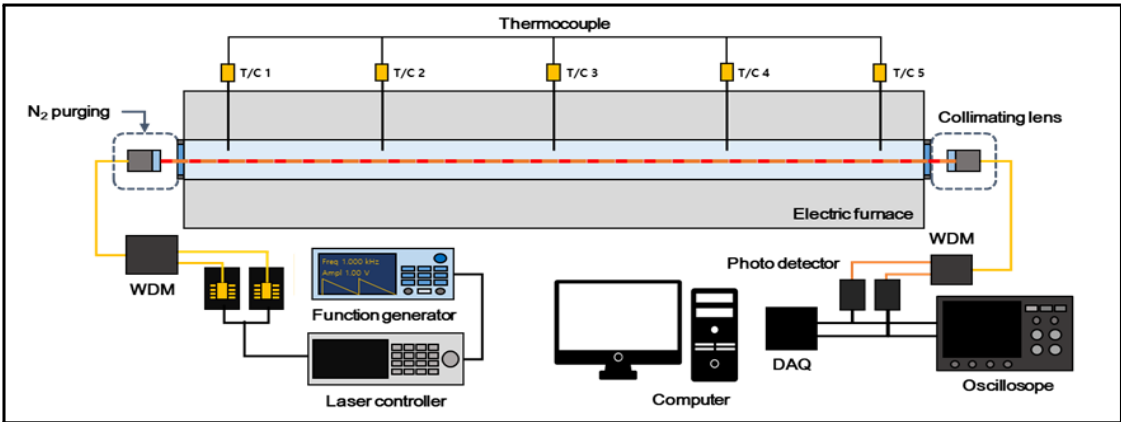


Fig. 4. Schematic diagram of the lab scale experimental setup

Fig. 2를 보면 각 가스 분자마다 흡수가 일어나는 파장영역이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 온도를 측정하기 위하여 연소 시스템 내부의 수증기(H₂O)를 이용하는데, 수증기(H₂O)의 경우 매우 광범위한 영역에 걸쳐서 흡수가 존재하며, 그중에서도 선강도가 높은 1.3 - 1.5 μm 사이의 다른 가스 분자의 간섭이 없는 파장 영역을 선정하였다. 선택한 파장은 1.34 μm 이다. [9]

산소(O₂) 측정을 위한 레이저 파장 선정 또한 수증기(H₂O)와 마찬가지로 측정 환경 내 다른 가스 분자와 간섭이 없으면서 선강도가 높은 파장을 선정하였으며, 이때의 중심 파장은 0.76 μm 이다. [3]

온도에 따른 수증기(H₂O)와 산소(O₂)의 선강도를 Fig. 3에 각각 나타내었다.

3.2. Lab scale 실험 장치

본 연구는 실제 연소 시스템 내부의 온도 및 농도를 실시간으로 측정하는 것이므로, 고온의 환경에서 온도와 농도를 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 실제 현장 실험에 앞서 Lab scale의 실험 장치를 이용하여 고온에서 온도 및 산소 농도 측정 실험을 진행하였다. Fig. 4. 에서는 Lab scale 실험 장치 구성을 보여준다.

측정하고자 하는 고온의 환경을 조성하기 위해서 전기로(Electric furnace)를 사용하여 연소시스템 내부 환경과 비슷하도록 1100 - 1300°C 의 온도를 설정하였다. 고온의 조건에서는 새로운 광 흡수 신호의 출현 등 가스의 광학적 거동이 달라질 수 있고, 선강도 S(T)의 온도 변동성을 고려하여 사전 점검이 중요하다. 이와 동시에, 20.9 %의 산소 농도를 1100 - 1300°C의 고온

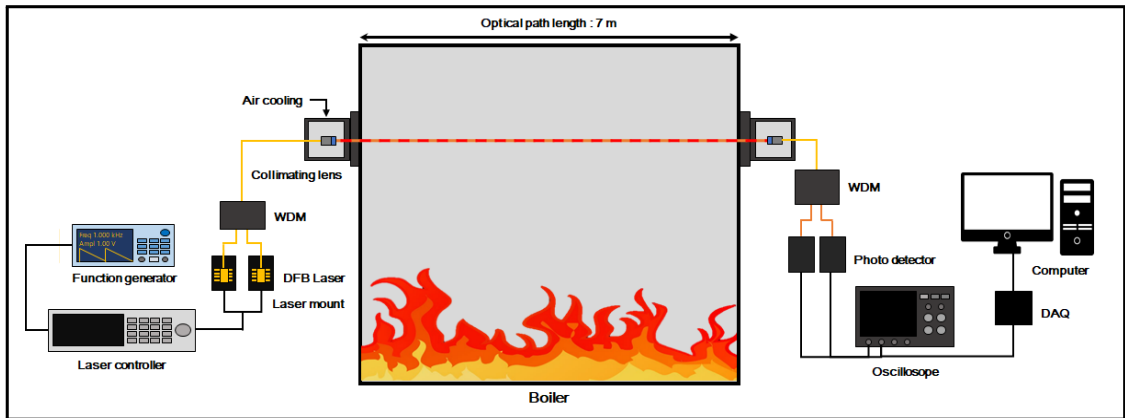


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental in combustion system

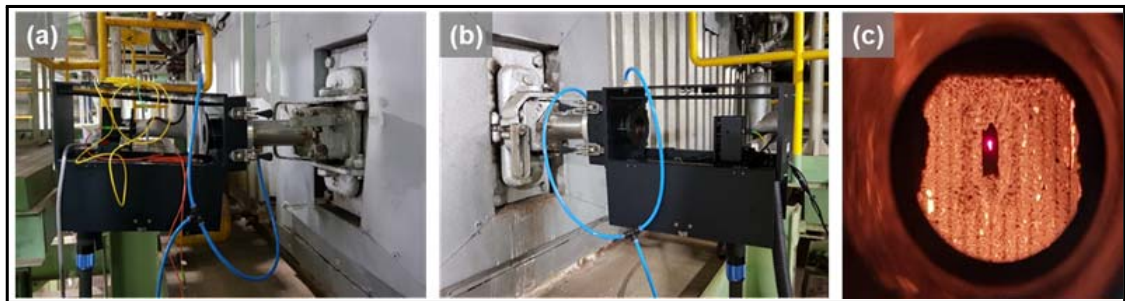


Fig. 6. (a) Sensorhead of the laser reception (b) Sensorhead of the laser transmission (c) Laser alignment

환경에서 거울(Mirror)을 이용하여서 광 투과 거리를 약 5 m로 만들어 실험을 진행하였다.

레이저 시스템은 크게 발신부와 수신부로 구성된다. 레이저 시스템의 발신부는 앞서 선정한 파장 영역인 근적외선 영역의 레이저 2대(NTT(1.34 μm), Eagleyard(0.76 μm))를 이용하였으며, 레이저를 원하는 파장에서 구동시키기 위하여 레이저 컨트롤러(ILX Lightwave, LDC-3908)를 사용하여 일정한 전류와 온도를 레이저에 인가하였다.

또한, 광 흡수 신호의 파장 가변 및 신호 분석을 위하여 레이저 빛을 일정한 주기와 진폭을 가지는 톱니 파형으로 변조시키기 위하여 함수발생기(Tektronix, AFG320)를 사용하였다.

온도와 농도 동시 계측을 위하여 WDM(Wavelength Division Multiplexing)을 사용하였다. WDM은 Multiplexer와 De-Multiplexer로 구성되어 있으며, 온도와 농도를 측정하기 위한 파장인 1.34 μm 와 0.76 μm 의 레이저 빛을 하나로 합치고(Multiplexer), 측정 구간 통과 후 다시 분리하는(De-Multiplexer) 역할을 한다.

WDM을 지난 두 파장의 레이저 빛은 각각 광 검출기(Photodetector, thorlabs)에 집광되며 신호 처리를 위해 DAQ(Data acquisition) 시스템으로 보내진다.

취득한 신호는 LabView를 기반으로 Eq. (7), (8)을 적용하여 제작한 소프트웨어를 이용하여 실시간으로 분석하였다.

3.3. 현장 실증 실험 장치

Lab scale 실험 내용 및 검증 결과를 바탕으로 하여, 실제 화력발전소에서 온도 및 산소 농도 측정 실험을 진행하였다.

현장은 중유를 원료로 하는 화력발전소이며, 실증 실험에서는 Lab scale 실험에서 사용한 장비를 토대로 하여서 실험 장치를 구성하였다. 측정 실험 적용 위치는 보일러 상단부로, 열교환기 바로 아래쪽이며 상승 기류를 이루는 화염의 끝단 부분이다, 보일러 벽면에 설치되어있는 광 측정 부분을 이용하여 보일러 한 쪽 면에서 내부를 관통하여 반대 면으로 레이저가 진행할 수 있도록 양면에 발신부와 수신부를 각각 설치하

Table 1. Experimental conditions

	Center wavelength	Temperature	Oxygen Concentration	Path length	
Lab scale	1349.2 nm	1100 - 1300°C		5 m	Temperature measurement
	760.8 nm	1100 - 1300°C	21 %	5 m	Concentration measurement
Emperical	1349.2 nm	1300 - 1350°C		7 m	Temperature measurement
	760.8 nm	1300 - 1350°C	3 - 4%	7 m	Concentration measurement

[단위 : °C]

여 실험 장치를 구성하였다. 이 때, 광 투과 거리 (Optical path length)는 약 7 m 이며, Fig. 5에 실증 실험 장치 구성을 나타내었다. 측정을 위한 기본적인 장치 구성은 Lab scale 장치와 유사하며, Cooling 시스템을 적용하여 보일러 벽면에서의 열로부터 장치가 과열 되는 것을 방지하도록 설계하였다. 발전소 가동 중의 현장 조건에서 측정하는 방식으로 실험을 진행하였으며, Fig. 6.은 실제 현장에 설치한 레이저 센서 헤드의 수신부와 송신부의 내부 모습 및 실제 보일러 내부에서 온도 및 산소 농도를 측정하기 위해서 초기 광 정렬하는 사진이다. Table 1에서 전체 실험 조건을 정리하여 제시하였다.

IV. 결 과

4.1. Lab scale 실험 결과

본 연구의 목적은 실제 석탄 화력발전 연소 시스템 내부의 온도 및 산소의 농도를 측정하는 것으로, 내부 수증기를 이용하여 온도를 측정한 뒤 그 온도 값을 실시간으로 반영하여 산소 농도를 측정해야한다. 이는 Eq. (7)의 온도를 구하는 식에서는 두 개 광 흡수 신호의 비율에 따라 측정값이 구해지므로 광 흡수 신호 면적 외에는 별도의 정보가 필요 없지만, Eq. (8)의 농도를 구하는 식에서는 온도에 따른 S(T)값이 변화하므로, 온도 값 정보가 정확하게 반영되어야하기 때문이다. 대형 연소시스템의 경우, 내부 온도 값의 편차가 크고 변동성이 있으므로 같은 위치에서 동시에 흡수 분광법을 이용하여 레이저 경로 상 선 평균 온도를 구하고 이를 바로 농도 측정에 반영하는 것이 유리하다. 실제 측정하고자 하는 환경과 유사하게 전기로를 이용하여 1100 - 1300°C에서 온도 측정 및 약 21 % 산소 농도를 동시에 측정하였다. 각 온도에서 약 10분 동안의 광 흡수 신호 데이터를 취득하였고 이를 평균하였다. TDLAS 실험에서는 1 kHz의 레이저 파장가변을 적용하여 1초당 약 1000개의 광 흡수 신호를 평균하여 1초간 평균 값을 구하고 이를 다시 10분간 축적하여 최종 평균값을 도출하였다. 동시에 전기로 내부 총

Table 2. Result of thermocouple measurement

온도 설정 값	T/C 1	T/C 2	T/C 3	T/C 4	T/C 5
1100	922	1065	1095	1056	958
1200	1008	1151	1187	1144	1044
1300	1091	1240	1274	1235	1140

[단위 : °C]

다섯 지점에 열전대(Thermocouple)를 설치하여 열전대를 이용한 10분간의 측정 평균값과 비교하였다. 아래의 Table 2에서 설정 값이 1100 - 1300°C인 각 온도 조건에서의 열전대 측정값을 보여준다. 산소 농도는 1100 - 1300 °C의 각 온도 조건에서 대기 중 산소 농도인 20.9 %을 기준으로 하여 측정값과 비교하였다.

Fig. 7.(a)는 1100°C - 1300°C 각 온도에서의 측정을 위한 광 흡수 신호를 나타낸 그래프이다.

그림에 표시된 두 개의 광 흡수 신호의 면적 비를 이용하여 온도를 계산하였다. 그림에서는 ①번과 ②번 광 흡수 신호는 온도에 따른 광 흡수 면적의 변화 정도가 다름을 확인할 수 있다. 이는 온도에 따른 선강도 값의 변동에 기인한 것이며, 가스의 고유한 광학적 특징이다. 이러한 변화 정도의 차이에 따라 온도 값 산출의 분해능이 달라진다. 각 온도에서 열전대 평균 측정값과 TDLAS 기법을 사용하여 10분정도 측정하여 평균한 결과 값을 비교하였을 때, 오차는 각각 2.0 %, 0.9 %, 1.4 %으로, 열전대를 이용하여 측정한 값과 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었으며, 이를 Fig. 7.(b)에 그래프로 나타내었다. 전기로 내부 고온의 산소 농도 측정은 대기 중 공기를 전기로에 주입하여 진행하였으며, 실시간으로 측정된 온도 값을 반영하여 농도 측정 실험을 수행하였다.

Fig. 7.(c)는 상온과 1100°C, 1200°C에서의 산소 광 흡수 신호를 나타낸 그래프이다. 고온으로 올라갈수록 선강도의 값이 낮아짐에 따라 광 흡수 신호가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 산소의 선강도 변화에

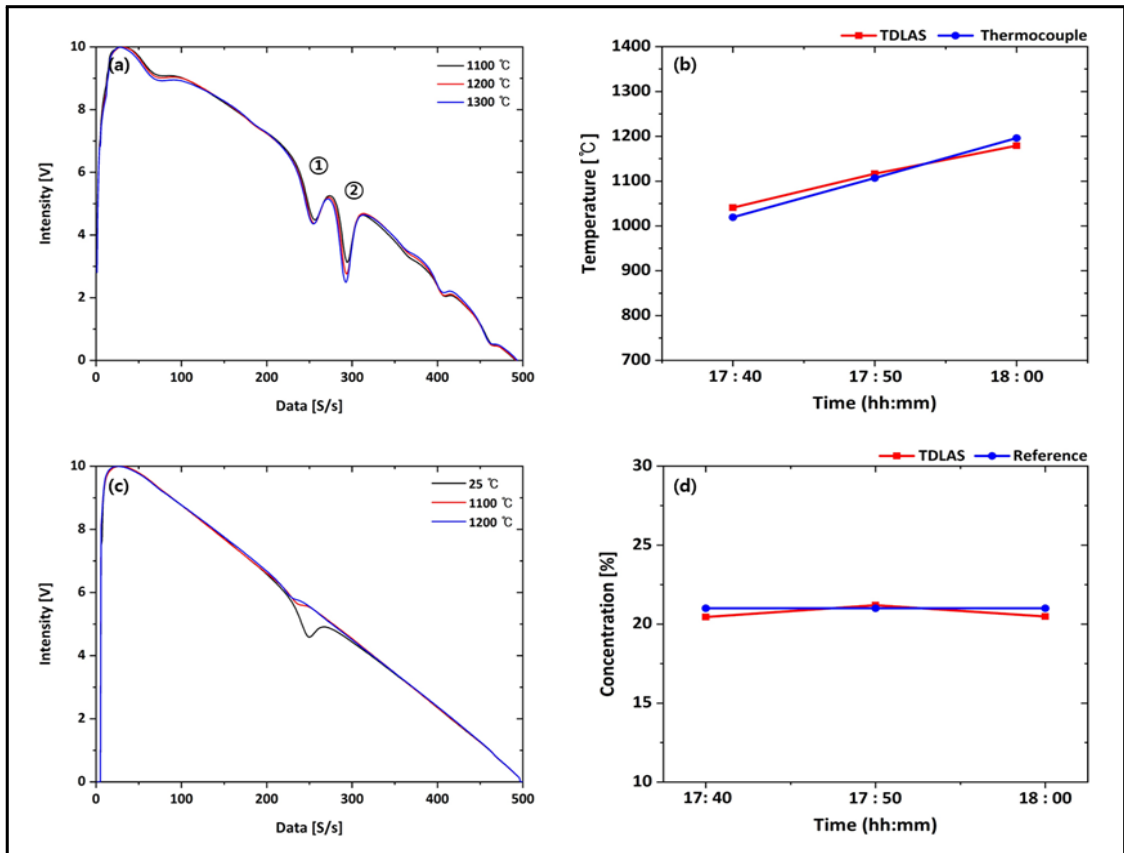


Fig. 7. Experimental result of lab scale test

기인한 것이다. 상온에서 해당 파장 광 흡수 신호의 선강도는 8.847×10^{-24} cm/mol이며, 1100°C에서는 2.445×10^{-24} cm/mol, 1200°C에서는 2.25×10^{-24} cm/mol이다. Eq. (8)에 온도별 선강도를 반영하여 고려하면 Fig. 7.(c)의 고온에서 광 흡수 신호 면적 축소 현상과 일치함을 확인할 수 있다. 또한, 앞서 설명한 농도 측정을 위한 정확한 온도 반영의 필요성을 알 수 있다. Eq. (8)을 이용하여서 고온에서의 산소 농도를 측정하였고, 이는 대기 중에 존재하는 약 21%와 비교하여 Fig. 7.(d)에 나타내었다, 이 때 오차율은 1100°C, 1200°C, 1300°C에서 각각 2.6%, 0.9%, 2.4%로 확인되었다.

4.2. 현장 실증 실험 결과

Lab scale 실험을 바탕으로 하여 실제 현장에서의 온도 및 농도 측정 실험을 진행하였다. 본격적인 실험에 앞서 기존 안정적인 환경에서의 Lab scale 실험과는 다르게 실제 보일러 내부 조건은 유속이 빠르고 미세 입자 등이 존재하는 난류 환경이므로 안정적으로

측정이 가능한지 여부를 우선적으로 약 5분 정도 테스트 하였다. Lab scale 실험과 마찬가지로 실시간으로 온도를 측정하고 측정된 온도를 선강도 값에 반영하여서 산소의 농도를 측정하였으며, 측정 결과는 Fig. 8에 나타내었다. TDLAS 기법을 이용하여 측정된 결과, 보일러 내부의 온도는 평균 약 1330°C로 측정되었으며 이때의 산소 농도는 평균 약 3.3%로 측정되었다. 온도의 경우 부하 변동이 없을 경우 비교적 일정한 온도 값이 유지됨을 확인할 수 있다. 산소 농도의 경우, 측정 위치가 화염 끝단이기 때문에 순간적인 연소 지연과 완료에 따른 농도변화를 확인할 수 있다. 이에 본 실험에서는 경향성 확인이 용이하도록 일정시간 동안의 도출값을 평균하여 제시하였다.

본 실험에서는 실제 보일러 내부의 온도 및 농도 측정 실험을 진행하여 발전소의 데이터와 비교하였다. TDLAS 기법을 이용하여 약 20시간 정도의 온도를 실시간으로 연속 측정하였으며, 동시에 측정된 온도 값을 반영하여 보일러 내부 산소 농도를 측정하였다.

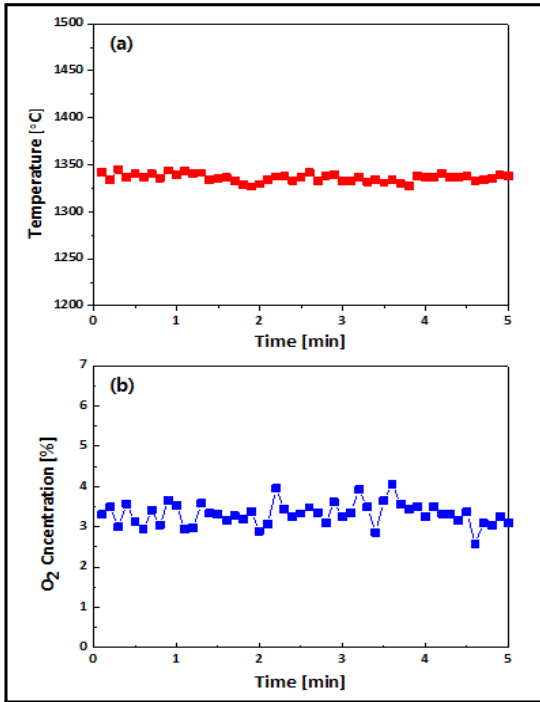


Fig. 8. Results of (a) temperature in boiler (b) O₂ concentration in boiler

발전소의 경우 보일러 내부 온도의 장시간 연속 측정이 불가능하여 본 연구에서는 발전 출력 값을 지표로 두어 경향성을 비교하였다. 또한 산소 농도의 경우, TDLAS 측정값 검증에 위해 발전소 굴뚝에서 측정되는 산소 농도 값과 비교하여 경향성을 검증하였다. 발전소 굴뚝 배기가스의 산소농도는 보일러 후단의 환경설비를 거치며 변화하기 때문에 정량적 농도 값이 보일러 내부의 농도 값과 직접적으로 비교하기는 어렵다. 그러나 연소 이후에는 정성적인 트렌드가 유지될 것이므로, 이를 고려하여 비교 데이터로 사용하였다.

TDLAS 방법을 이용하여 실시간으로 측정된 결과와 발전소의 데이터를 비교하여 Fig. 9.에 나타내었다. 먼저, Fig. 9.(a)의 온도 그래프를 보면, 발전소 출력 상승, 하강과 보일러 측정 온도 값이 비교적 유사한 경향성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 출력 상승 시에는 연료 투입량 증가에 의해 보일러 연소실 내부 온도도 상승하는 것으로 파악된다. 또한, 산소 농도를 나타낸 Fig. 9.(b)를 보면, 약간의 차이는 있으나 전체적으로는 유사한 경향성을 나타내고 있다. 산소의 경우 대형 연소시스템에서는 넓은 반응 공간 내 균일한 농도를 보이는 것이 어렵다. 이에 국부적인 차이가 종종 나타나

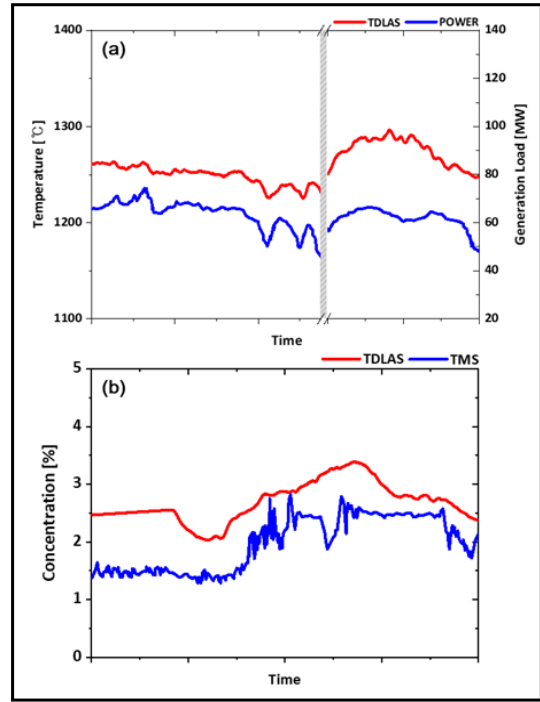


Fig. 9. Comparison of (a) TDLAS(H₂O) and power load (b) TDLAS (O₂) and O₂ concentration of exhaust gases

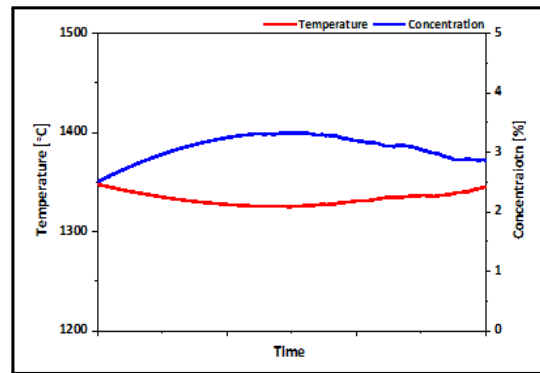


Fig. 10. Correlation of temperature and O₂ concentration

는 것으로 사료된다.

추가적으로, 일부 구간에서 온도 및 산소 농도의 상관관계를 비교한 그래프를 Fig. 10.에 나타내었다. 그래프를 보면 배출되는 산소 농도 양의 증가는 실제 연

소실의 공연비 증가를 의미하며, 이에 따라 연소실 내부의 온도는 낮아지는 Trade-off를 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 광학적 측정 방식인 TDLAS 기법을 이용하여 실제 발전소 연소시스템 내부의 수증기와 산소를 이용하여 온도와 농도를 실시간으로 측정하였다. HITRAN Database를 이용하여 측정하고자 하는 온도 범위 내에서 연소 생성물들과의 간섭을 확인하였으며, Lab scale 기초 실험을 통하여 1100 - 1300°C 온도 측정 및 고온 환경에서의 21 % 산소 농도를 측정하였으며, 다른 측정방법들과 결과를 비교하였을 때 낮은 오차율을 보인다는 것을 확인하였다.

이를 기반으로 실제 발전소 연소시스템 내부의 온도와 산소 농도를 실시간으로 측정하였다. 측정 결과 난측 환경에서도 평균 온도 1330 °C, 산소 농도 평균 3.3 %로 비교적 안정적인 측정값을 얻을 수 있었다. 실제 발전소 데이터와 측정값을 비교한 결과, 발전 출력 값과 실제 보일러 내부 온도가 비슷한 경향성을 보이며, 발전소 굴뚝의 산소 농도와 비교하였을 때, 측정된 산소 농도의 측정값과 유사한 경향성을 나타내었다. 또한, 측정된 온도와 산소농도의 상관관계를 확인해보았을 때, 산소 농도가 증가함에 따라 연소실 내부 온도가 낮아지는 Trade-off 관계를 확인할 수 있었다. 이러한 결론을 종합하면, TDLAS 방법은 대형 연소시스템 내부를 실시간으로 모니터링 하여 연소 진단 및 제어에 효과적으로 적용할 수 있는 방법 중 하나라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20161110100230 / No. 20181110100320).

사용기호

T_v	: Fractional transmission
I	: Transmitted laser intensity
I_0	: Incident laser intensity
k_v	: Spectral absorption coefficient [cm^{-1}]
L	: Path length [cm]
α	: Spectral absorbance
P	: Total Pressure [atm]
X	: Mole fraction
S	: Linestrength [$\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1}$]

Φ	: Lineshape function
A	: integrated area of absorbance
P_{abs}	: Partial pressure of the absorbing species
T_0	: Reference temperature [K]
T	: Gas temperature [K]
E''	: Lower state energy [cm^{-1}]
h	: Plank constant
k	: Boltzmann constant
c	: Speed of light

REFERENCES

- [1] Korea Energy Economics Institute, "Monthly Energy Statistics", *KEEI*, 35-04, (2019)
- [2] Christopher S. Goldenstein, F.Mitchell Spearrin, Jay. B. Jeffries and Ronald K. Hanson "Infrared laser-absorption sensing for combustion gases", *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 132-176, (2016)
- [3] Nam-Wook Cho, In-Gu Lee and Jong-Cheon Lee, "A Study on Remote Analysis of Fire Gas Using Open Path FT-IR", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 17(6), 39-45, (2013)
- [4] V.Ebert, H. Teichert, P. Strauch, T.Kolb, H. Seifert and J. Wolfrum, "Sensitive in situ detection of CO and O₂ in a ratrary kiln-based hazardous waste incinerator using 760 nm and 2.3 μm diode lasers", *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, 1611-1618, (2005)
- [5] H. ERIC SCHLOSSER, JURGEN WOLFRUM, VOLKER EBERT, BRADLEY A. WILLIAMS, RONALD S. SHEINSON AND JAMES W. FLEMING, "In situ Determination of Molecular Oxygen Concentrations In Full-scale Fire-suppression Test Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy", *Proceedings of the Combustion Institute*, 20, 353-360, (2002)
- [6] Xiang Liu, Jay B Jeffers and Ronald K Hanson, "Measurement of spectral parameters of water-vapor transitions 1388 and 1345 nm for accurate simulation of high-pressure absorption spectra", *Meas. Sci. Technol.*, 18, 1185-1194, (2007)
- [7] Xin Zhou, Xiang Liu, Jay B Jeffries and R K Hanson, "Development of a sensor for temperature and water concentration in combustion gases using a single tunable diode laser", *Meas. Sci. Technol.*, 14, 1459-1468, (2003)

- [8] I.E. Gordon et al, "The HITRAN2016 molecular spectroscopic database", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 203, 3-69, (2017)
- [9] Xiang Liu, Xin Zhou, Jay B. Jeffries, Ronald K. Hanson "Experimental study of H₂O spectroscopic parameters in the near-IR (6940-4770 cm⁻¹) for gas sensing applications at elevated temperature", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 103, 565-577, (2007)