

흡수분광학을 이용한 배기가스의 시간 평균 온도 및 농도 측정

김형호* · 전민규**†

Measurement of Time-Averaged Temperature and Concentration of Exhaust Gas using Absorption Spectroscopy

Hyoung-Ho Kim*, Min-Gyu Jeon**†

Key Words : Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy(가변 다이오드 레이저 흡수 분광법); Exhaust gas(배기 가스); Temperature(온도); Concentration(농도); Data Reconstruction(데이터 재구성)

ABSTRACT

Measuring the total emissions of exhaust gases resulting from fuel utilization is considered crucial. Traditionally, evaluating the combustion process involves assessing exhaust gas temperature and concentration. However, conventional measurement techniques utilizing thermocouples face limitations in accurately gauging irregular and rapidly fluctuating temperature readings, primarily due to localized sample contact. In this study, the real-time fluctuations in the time-averaged temperature and exhaust gas concentration were evaluated. The primary objective is to measure the temperature and concentration of the target gas using TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), an optical measurement method. Furthermore, by employing a multi-laser configuration, real-time variations in temperature and concentration within the exhaust gas can be easily examined in a two-dimensional format.

1. 서론

대기환경 오염에 관한 관심은 국내외에서 크게 작용하고 있다. 그러한 노력으로서 각국에서는 2050년까지 탄소 중립을 달성하려는 목표를 세우고 수행하고 있다. 기술적 관점에서 연료의 사용으로 배출되는 배기가스의 총량을 측정하는 것이 중요하다 볼 수 있다. 차량과 선박 등 연료를 사용하여 에너지를 얻고 있으며, 탄소 배출량을 줄이기 위해 완전 연소의 조건을 달성하는 것이 중요하다. 일반적으로 연소상태를 평가하기 위해 배기가스의 온도 및 농도를 평가하면 된다. 기존에는 온도 측정에 열전대를 이용한 국부 영역 접촉에 의한 표본 측정으로 불규칙하고 짧은 시간 급변하는 온도 측정에 한계를 가진다⁽¹⁻³⁾. 최근에는 비접촉 광학식 측정법인 TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy)를 이용하여 대상 가스의 온도를 측정하고자 한다⁽⁴⁻⁸⁾. 또한 다열의 레이저 구성으로 2차원 또는 3차원 측정을 하기 위한

CT-TDLAS (computed tomography -tunable diode laser absorption spectroscopy) 사례도 있다⁽⁹⁻¹⁴⁾. 하지만 해당 연구는 특정가스의 온도만을 측정한 것으로 열전대 측정값과 비교에 중점을 두고 있다. 위와 같이 기존 연구의 대부분은 측정 대상 가스에 대해 온도를 측정하고 연소상태가 유지되는 안정된 상태에 대한 측정에 국한되어 있다. 하지만 배기가스의 연소상태는 불규칙적이고 짧은 시간에 급변하므로 실시간 온도 및 농도변화를 평가할 필요성이 있다.

본 연구에서는 흡수분광학을 이용한 TDLAS 측정장치를 2차원으로 구성하여 프로판 (C₃H₈)-공기 예혼합 화염의 소화 과정을 실시간으로 측정하고자 한다. 연소상태를 2차원 온도 및 농도 장으로 재구성 함으로서 1점 표본 측정에 대한 한계를 극복하고자 한다. 또한 실시간 온도 및 농도 장을 함께 평가함으로써 배기가스의 시간 평균 온도 및 농도 측정 결과를 분석을 목적으로 삼고 있다.

* 경상국립대학교(Gyeongsang National University)

** 해군사관학교(Republic of Korea Naval Academy)

† 교신저자, E-mail : mgjeon@navy.ac.kr

2023 한국유체기계학회 동계학술대회 발표 논문, 2023년 11월 29일~12월 1일, 제주 ICC

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 27, No. 2, April 2024, pp.50~56(Received 13 December, 2023; revised 04 January, 2024; accepted for publication 21 January, 2024)

2. 흡수분광학 측정 이론

2.1 TDLAS 기법

TDLAS는 조정 가능한 파장 대역의 레이저 광을 측정하고자 하는 대상 가스에 조사하였을 때 기체분자가 해당 파장 대역의 빛을 흡수함을 이용한 흡수분광학 측정 이론이다. 기체분자의 흡수도를 레이저 광원의 입사광과 투과광의 차이로 측정할 수 있다. 이러한 원리의 지배방정식은 다음 식 (1)인 Lambert Beer's 법칙으로 설명할 수 있다.

$$\frac{I_t(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp\{-A_\lambda\} = \exp\left\{-P \sum_i (n_i \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) \cdot G_{vi,j})\right\} \quad (1)$$

I_t	투과광	n_i	종밀도
I_0	입사광	L	측정 길이
A_λ	흡광도	$S_{i,j}$	선강도
P	압력	$G_{vi,j}$	확장함수

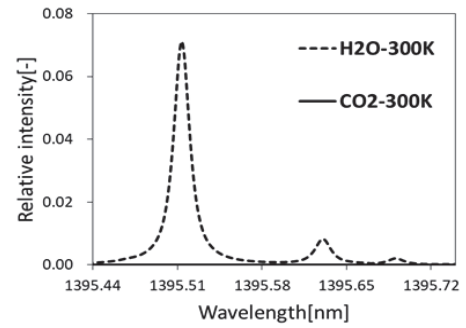
이 연구에서는 프로판-공기 예혼합 화염의 연소생성물인 H₂O 가스의 고유 흡광도를 측정하기 위해 1395nm 파장 대역을 선정하였다. 흡수분광학 사용에 있어 측정 파장대역의 선정은 매우 중요하다. 연소 시 발생하는 연소생성물의 종의 다양함으로 사용하고자 하는 파장대역에서 서로의 간섭이 발생하는지 판단하는 과정이 중요하다. 본 연구에서는 농도장을 측정하는 것이 중요한 목표이므로 측정하고자 하는 한 물질의 선택적 측정을 할 수 있어야 한다.

Fig. 1은 연소 시 발생하는 대표적 물질인 H₂O와 CO₂의 1395nm 파장대역에서의 간섭도를 보인다. 1395nm 대역에서는 H₂O의 흡광도가 크게 나타나고 CO₂의 흡광도의 영향을 받지 않음을 보여준다.

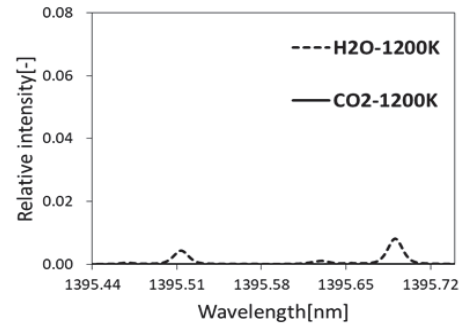
농도 값을 구하기 위해 측정가스의 몰 분율을 구해해야 한다. 식 (1)로부터 확장함수 $G_{vi,j}$ 를 정규화하여 값이 1이 되도록 식 (2)와 같이 측정 가스 분자의 몰 분율 값이 계산된다.

$$n_i = \frac{A}{P \cdot S_{i,j}(T) \cdot L} \quad (2)$$

Fig. 2는 흡수분광학의 이론적 접근법인 HITRAN database⁽¹⁵⁾를 이용한 상온에서 고온에서의 흡수 스펙트럼 변화를 보인다. 해당 정보로부터 연소 시 발생하는 H₂O 가스의 경우 1395.513nm (#1), 1395.692nm (#2)의 대표 파장대역에서 높은 온도의존성을 확인할 수 있다. 흡광도 정보로부터 온도결과를 추정하기 위해 Fig. 3과 같이 #2/#1의 비율을



(a) low temperature



(b) high temperature

Fig. 1 Confirmation of interference in theoretical absorption spectra

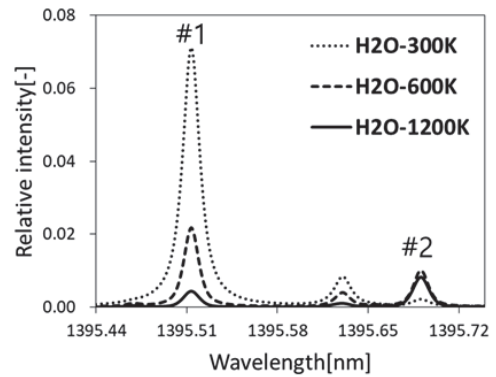


Fig. 2 Relative intensity changes with variations in temperature

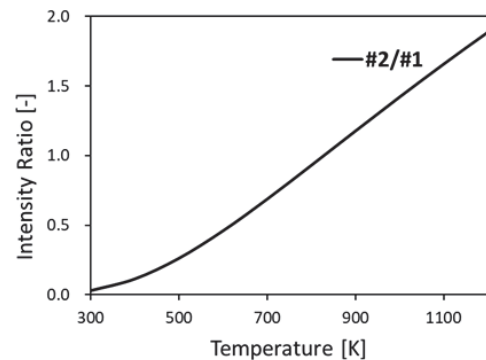


Fig. 3 Temperature estimation using the intensity ratio

이용하여 선형 그래프를 구할 수 있으며, 해당 흡수 스펙트럼의 강도 비를 이용하여 측정 영역의 온도를 추정할 수 있다.

2.2 온도 및 농도장의 재구성

일반적으로 TDLAS 기법은 line of sight 방식으로 2차원 또는 3차원의 정보는 제공할 수 없다. 본 연구에서는 TDLAS에 CT (computed tomography)를 접목한 CT-TDLAS 기법을 적용하기 위해 Fig. 4와 같이 mesh 형태로 흡수 스펙트럼을 수집하였다. 모든 레이저로부터 수집한 정보와 이론적 재구성은 mesh 내 그리드 지점에서 수행 되었다.

다음 식 (3)은 단위 길이 당 레이저의 흡광도를 계산하는데 사용된다. 이 방정식은 레이저가 각 그리드를 통과할 때 측정 가스가 레이저의 빛을 흡수한 정보를 제공한다.

$$A_{\lambda,j} = - \sum_i n_i \cdot L_{i,j} \cdot \alpha_{\lambda,i} \quad (3)$$

- $A_{\lambda,j}$ 단일 레이저 j 라인의 흡광도
- $L_{i,j}$ 단일 그리드 i 내 경로 길이
- $\alpha_{\lambda,i}$ 흡수 계수

CT-TDLAS 기법을 이용하여 2차원 온도 및 농도 장을 재구성하기 위해 식 (3)에서의 흡수 계수 $\alpha_{\lambda,i}$ 를 식 (4)의 토모그래피 알고리즘인 SMART (simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique)⁽¹⁶⁾을 적용하여 Fig. 5의 절차에 따라 실험값과 이론으로 재구성한 흡광도 값이 최소화 되도록 계산을 수행하였다.

$$\alpha_{\lambda,i}^{k+1} = \alpha_{\lambda,i}^k \cdot \exp\left(\sum_{j=1}^J \frac{L_{i,j}}{\sum_{i=1}^I L_{i,j}} \cdot \log \frac{A_{\lambda,j}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} \cdot L_{i,j}}\right) \quad (4)$$

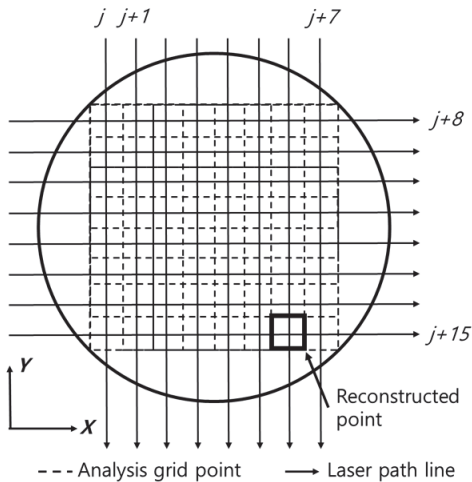


Fig. 4 Tomographic reconstruction method

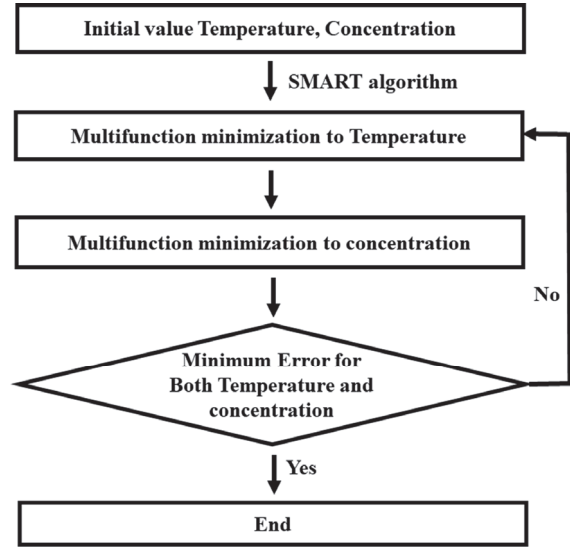


Fig. 5 Determining Temperature and Concentration at All Grids in CT-TDLAS

Fig. 4에서와 같이 총 16개의 흡광도 값을 Fig. 5의 절차에 따라 실험값과 이론으로 재구성한 흡광도 값이 최소화 되도록 평균 제곱 오차 식 (5)를 이용한다.

$$MSE = \sum ((A_{\lambda,i})_t - (A_{\lambda,i})_e)^2 \quad (5)$$

- $(A_{\lambda,i})_t$ 이론 흡광도
- $(A_{\lambda,i})_e$ 실험 흡광도

3. 흡수분광학 측정 방법

흡수분광학 장치인 CT-TDLAS 측정을 위한 장치의 구성은 Fig. 6과 같다. 일관된 연소 조건을 적용하기 위해 질량 유량계를 사용하여 프로판과 공기를 예혼합하여 버너를 구성하였다. 당량비가 1.005인 연소 조건의 매개변수는 Table 1에 요약되어 있다.

2차원 TDLAS 측정부는 버너 상부 22.5mm 에 위치하며 레이저 송신부 (collimator)와 수신부 (photo detector)는 Fig. 7와 같이 mesh 형태로 배열되어 있다.

H₂O 가스의 흡수 스펙트럼 분석에 CT-TDLAS를 적용하였다. 1360-1460nm 파장 대역의 DFB (distributed feedback) 다이오드 레이저 (DFB type, NTT Electronics Co., NLK1E5GAAA)를 이용하였다. 단일 레이저의 광원을 Fig. 7과 같이 16열의 송신부로 분배기를 이용하여 분해하였다. 각 레이저 배열의 간격은 8mm로 배치하여 mesh 형태를 구현하였다. 본 연구에서 소화 과정을 시간변화에 따른 H₂O 가스의 온도 및 농도 변화를 관찰하기 위해 완전연소 조건인 Table 1의 조건에서 산소 공급을 중단하였다.

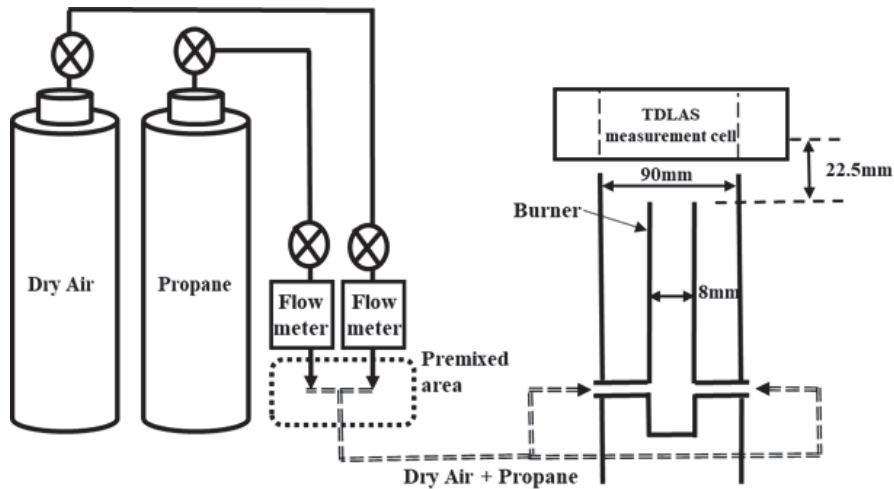


Fig. 6 Experimental Apparatus for Flame Burner 2D Measurement Using TDLAS

Table 1 Experimental parameters

Condition	Propane (L/min)	Dry air (L/min)	Equivalence ratio
Propane-Air premixed flame	0.015	0.360	1.005

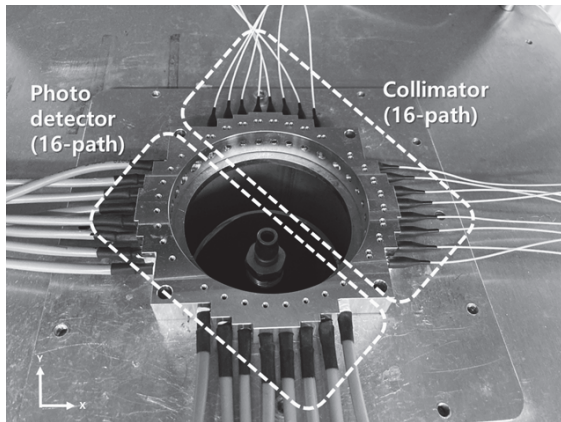


Fig. 7 2D Measurement Cell for 16 Paths

4. 2차원 온도 및 농도장 측정 결과

본 연구에서 연소 후 생성물인 H₂O 가스의 흡광도 분석을 통해 연소상태를 실시간으로 평가하고자 한다. 먼저 CT-TDLAS의 측정 신뢰도 및 연소의 일관성을 평가하기 위해 Table 1 조건에서 열전대의 결과와 비교하였다. Fig. 7에서 측정부의 중심부인 동일 위치에서 측정하였으며 그 결과 Fig. 8과 같다.

측정의 신뢰도 평가에 열전대와 CT-TDLAS 측정을 각각 10회 수행하였다. 연소 전 실험실 환경에서의 열전대의 평균 온도는 296.65 K 였으며, CT-TDLAS 는 297.5 K 였다. 두 측정법 간의 온도 측정값의 오차가 작음을 확인할 수 있다. Table 1의 완전연소 조건에서 열전대의 평균 온도는 1125.41

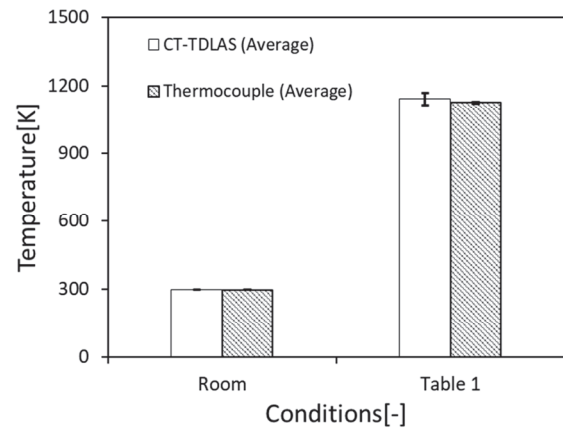


Fig. 8 Relative evaluation of temperature measurement

K 였으며, CT-TDLAS 는 1142.0 K 였다. 두 측정법 간의 온도 측정값 또한 오차가 작음을 확인할 수 있다. 하지만, CT-TDLAS의 표준 편차는 27.12 K 였으며, 열전대는 4.06 K 이므로 비접촉 광학식 측정법인 CT-TDIAS가 측정 민감도가 높음을 확인할 수 있었다. Table 1인 포화 연소조건에서 산소 공급을 중단하였을 때 500ms의 시간간격으로 변화하는 연소상태를 평가하고자 하였다. Fig. 9는 온도장의 변화를 시간변화에 따라 보이고 있다. 화염이 측정 셀의 중심부에 위치하여 최대온도를 보이며 외곽으로 갈수록 낮은 온도를 보인다.

Fig. 10은 농도장의 변화를 시간변화에 따라 보이고 있다. Fig. 9와 같이 고온부에서 H₂O의 농도는 높게 나타남을 확인할 수 있다. 완전연소 조건에서 산소공급을 중단하였을 때 H₂O의 농도는 급격하게 낮아짐을 확인할 수 있다. H₂O가스의 최대농도 3850ms 일 때 6.07% 였으며, 4850ms 일 때 2.60% 였다.

Table 1의 프로판과 공기의 예혼합 화염의 당량비가 1인 완전연소 조건에서 9.85%의 H₂O 가스가 연소생성물로 나타

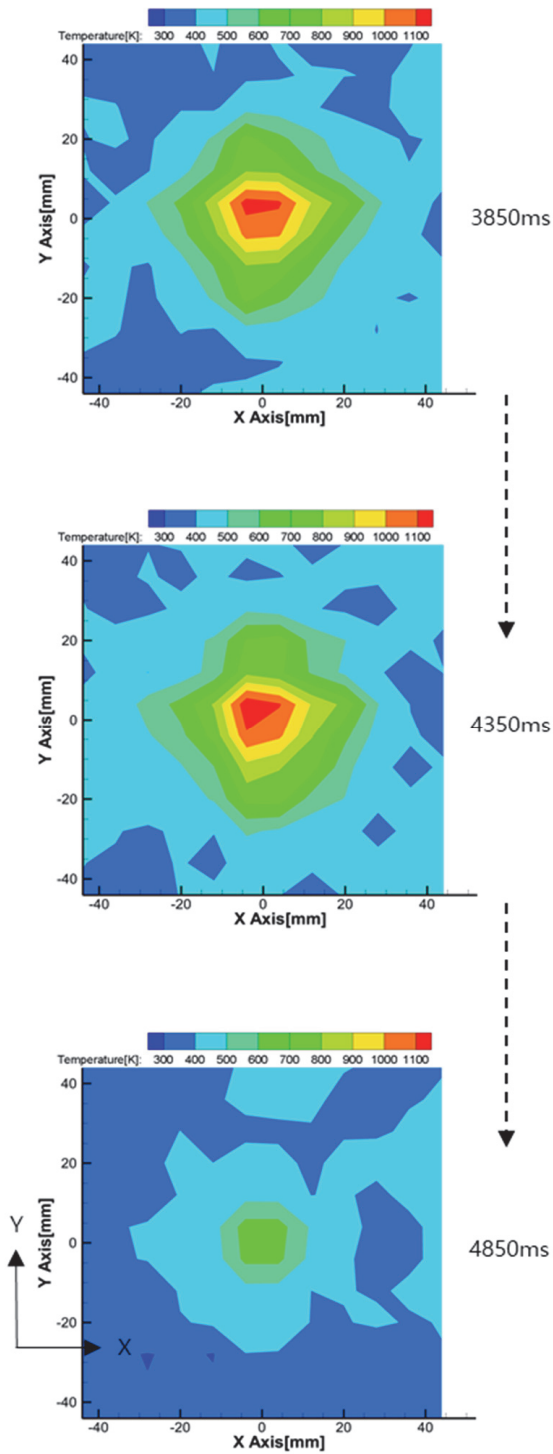


Fig. 9 2D real-time measurement results (Temperature)

난다. 본 연구에서 CT-TDLAS의 측정부는 버너로부터 22.5mm 떨어져 있으며 외부 공기와의 혼합으로 낮은 농도 값이 나타남을 판단할 수 있다.

연소생성물인 H₂O 가스의 농도를 X축으로 4mm, 20mm, 36mm 위치에 Y축 길이방향 변화에 따라 농도변화를 측정할 결과는 Fig. 11과 같다. 포화연소 상태인 3850ms에서 500ms 간격으로 소화되는 과정을 측정할 결과 X=4mm인

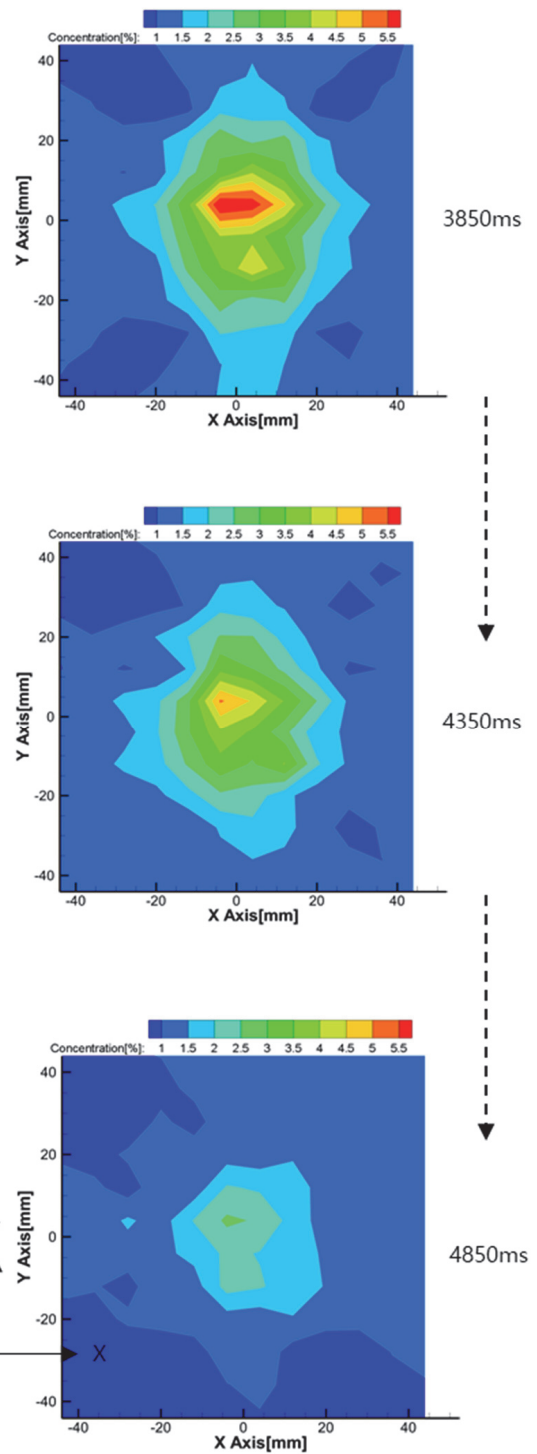


Fig. 10 2D real-time measurement results (Concentration)

경우 평균 2.14%에서 1.48%로 농도가 낮아졌으며, X=20mm 구역에서는 1.63%에서 1.41%로 낮아졌다. 또한, X=36mm 구역에서는 1.16%에서 0.82%로 나타나는 현상을 확인할 수 있다. 위 결과로부터 버너의 중심부가 측정 셀의 중심에 위치하여 있어 H₂O의 발생량이 높았으며 셀의 외곽으로 갈수록 주변공기와의 희석 등의 영향으로 H₂O의 농도가 급격히 낮아짐을 확인할 수 있다.

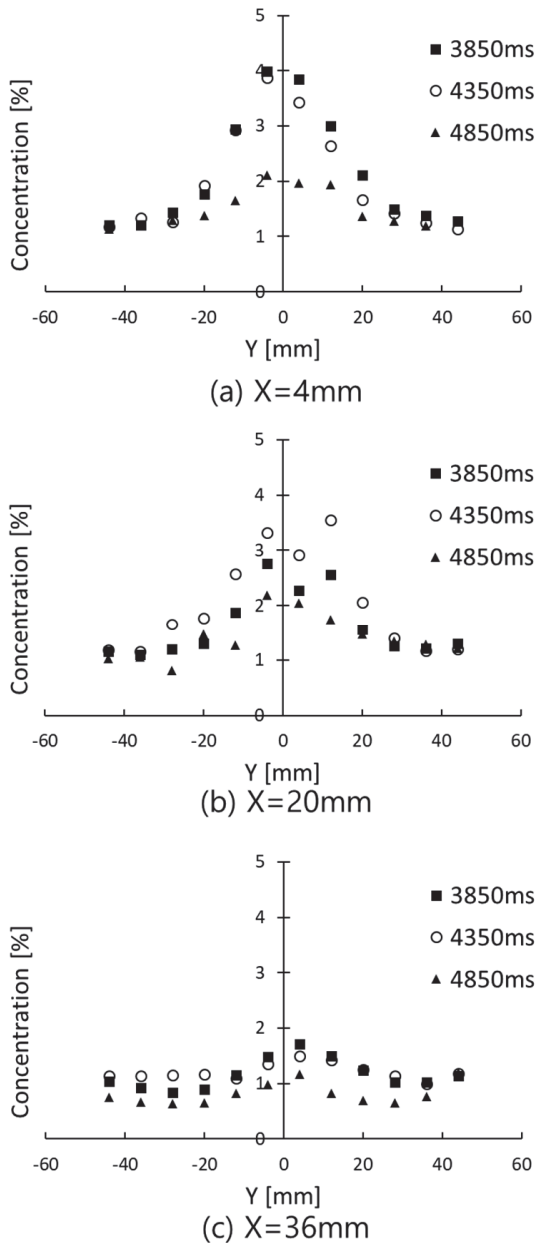


Fig. 11 Evaluating concentration measurements relative to their location

5. 결론

본 연구에서 2차원 TDLAS 측정 장치를 활용한 CT-TDLAS 측정 장비를 구성하여 연소 후 생성물인 H₂O 가스의 흡광도 분석을 통해 연소상태를 실시간 평가하였다. TDLAS의 광학 측정 배열을 mesh 형태로 구성하여 2차원 온도 및 농도장을 동시에 재구성하여 1점 표본 측정의 한계를 극복하여 500ms 시간 간격의 정확한 정보를 제공할 수 있었다. 포화연소 상태에서 열전대와 온도 측정결과를 비교하여 광학식 측정법인 CT-TDLAS와의 오차가 16.6K 로 유사한 결과를 확인하여 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한, 표준편차가 CT-TDLAS

의 경우 27.12 K 였으며, 열전대는 4.06 K 이므로 CT-TDLAS의 경우가 보다 민감한 측정을 하였다고 판단된다. 연구의 목적인 평균 온도 및 농도를 위치별 평가한 결과 버너의 중심부에서 연소가 활발하여 H₂O의 온도 및 농도가 높게 나타나며 측정 셀의 외곽으로 갈수록 주변 공기와의 희석의 영향으로 낮은 온도 및 농도가 나타남을 실험결과로 확인 가능했다.

본 연구 결과 광학식 흡수분광법을 응용하여 배기가스의 시간 평균 농도 측정 결과를 분석 가능함을 확인할 수 있어 향후 배출가스 등의 엄격한 규제 등에 대응할 수 있는 정밀한 측정법이 사용가능할 것으로 판단된다.

후 기

논문은 2024년도 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

References

- (1) Heitor, M. V., and Moreira, A. L. N., 1993, Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 19, pp. 259-278.
- (2) Brohez, S., Delvosalle, C., and Marlair, G., 2004, A Two-Thermocouples Probe for Radiation Corrections of Measured Temperature in Compartment Fires, Fire Safety Journal, Vol. 39, pp. 399-411.
- (3) Kim, C. S., Hong, S. D., and Kim, Y. W., 2012, Radiation-corrective gas temperature measurement in a circular channel, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 75, pp. 157-167.
- (4) Rieker, G. B. et al., 2007, Rapid measurements of temperature and H₂O concentration in IC engines with a spark plug-mounted diode laser sensor, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, No. 2, pp. 3041-3049.
- (5) Liu, X., Jeffries, J. B., Hanson, R. K., Hinckley, K. M., and Woodmansee, M. A., 2006, Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature, Applied Physics B, Vol. 82, No. 3, pp. 469-478.
- (6) Sumizawa, H., Yamada, H., and Tonokura, K., 2010, 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.
- (7) Anderson, T. N., Lucht, R. P., Priyadarsan, S., Annamalai, K. and Caton, J. A., 2007, 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.

- (8) Magnuson, J. K., Anderson, T. N., and Lucht, R. P., 2008, 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.
- (9) Kamimoto, T., and Deguchi, Y., 2015, 2D Temperature Detection Characteristics of Engine Exhaust Gases Using CT Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, *International Journal of Mechanical Systems Engineering*, Vol. 1, No. 109, 7 pages.
- (10) Kamimoto, T., Deguchi, Y., and Kiyota, Y., 2015, 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.
- (11) Choi, D. W., Jeon, M. G., Cho, G. R., Kamimoto, T., Deguchi, Y., and Doh, D. H., 2016, 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.
- (12) Jeon, M. G., Deguchi, Y., Kamimoto, T., Doh, D. H., and Cho, G. R., 2017, Performances of new reconstruction algorithms for CT-TDLAS (computer tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy), *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, pp. 1148-1160.
- (13) Jeon, M. G., Doh, D. H., and Deguchi, Y., 2019, 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.
- (14) Jeon, M. G., Hong, J. W., Doh, D. H., and Deguchi, Y., 2020, "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.
- (15) Rothman, L. S. et al., 2009, The HITRAN2008 Molecular Spectroscopic Database, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 110, pp. 533-572.
- (16) Byrne, C., 2005, Choosing Parameters in Block-Iterative or Ordered Subset Reconstruction Algorithms, Vol. 14, No. 3, pp. 321-327.