

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2019.43.11.787>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

CT-TDLAS를 이용한 3차원 연소분포 측정§

전민규* · 도덕희*† · Yoshihiro Deguchi**

* 한국해양대학교 기계공학부, ** 도쿠시마대학교 첨단과학기술대학원

Measurement of Three-Dimensional Combustion Distribution using CT-TDLAS

Min-Gyu Jeon*, Deog-Hee Doh*† and Yoshihiro Deguchi**

* Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime & Ocean Univ.,

** Graduate School of Advanced Technology and Science, Tokushima Univ.

(Received July 1, 2019 ; Revised July 18, 2019 ; Accepted August 27, 2019)

Key Words: Computed Tomography(전산화 단층촬영), Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy(가변 다이오드 레이저 흡수 분광법), Temperature(온도), Data Reconstruction(데이터 재구성), Exhaust Gas(배기가스)

초록: 에너지 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 연소 가스에 대한 정확한 측정이 필요하다. TDLAS 기술로 대상 가스의 온도와 농도를 동시 측정할 수 있다. 현재 가스의 정밀 제어가 필요한 산업공정에 2차원 또는 3차원의 정보를 측정할 수 있는 실험적 보고는 미비하다. 본 연구에서는 산업공정의 연소를 제어하고 모니터링하고자 CT-TDLAS 시스템을 이용한다. 메탄-공기 예혼합화염의 3차원 온도 분포는 CT-TDLAS 시스템에 의해 측정되었으며, 3차원 온도 분포는 2차원 셀의 5개 층으로 측정하였다. 특히 흡수 스펙트럼의 3차원 재구성에 SMART 알고리즘을 적용하였다. 열전대와 CT-TDLAS로 모든 층의 온도를 비교한 결과 온도의 평균 상대오차가 19.7K로 정확하게 측정되었다.

Abstract: In order to use energy resources efficiently, accurate measurement of combustion gases is necessary. Measurement of the temperature and concentration of a target gas is possible with tunable laser absorption spectroscopy (TDLAS) technique. The TDLAS technique can be used to control and monitor combustion in industrial processes. The 3-dimensional temperature distribution of methane-air premixed flame was measured using the constructed computed tomography tunable diode laser absorption spectroscopy (CT-TDLAS) system. The 3-dimensional temperature distributions are measured by five layers of the 2-dimensional cell. The simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique (SMART) algorithm was adopted for reconstructing the absorption coefficients on the meshes. As a result of comparing the temperatures for all the layers using thermocouples and the CT-TDLAS technique, it was possible to accurately measure the average relative error of temperature as 19.7 K.

1. 서론

환경규제를 하기 위한 일환으로서, 1992년 EURO 1로부터 시작하여 2015년부터 EURO 6을 국내에 적용하였다. EURO 6 기준을 만족하기 위해서 자동차에 신형엔진을 장착하거나 SCR(Selective Catalytic Reduction), EGR(Exhaust Gas Recirculation)

과 같은 별도의 공해저감장치를 장착이 필요하므로 원가 상승에 원인이 된다. 따라서 자동차와 선박 등에서의 배출되는 가스의 농도 및 온도에 대한 정확한 측정이 필요하다.

Fine 등⁽¹⁾의 연구에 CO, NO_x 및 NH₃와 같은 다양한 가스를 검출하기 위해 금속 산화물 반도체 센서를 구축하였다. 또한, Wang 등⁽²⁾은 배기가스의 CO₂를 측정하기 위해 표면탄성과 마이크로 센서를 사용하였다. 하지만 현재의 배출량 산정방식은 배기구에 설치된 1점(point wise)에 대한 표본추출에 의거하고 있으므로 가스의 실제 배출량을 산정

§ 이 논문은 대한기계학회 열공학부문 2019년 춘계학술대회(2019.5.22.-24., 부산 BEXCO) 발표논문임.

† Corresponding Author, doh@kmou.ac.kr

© 2019 The Korean Society of Mechanical Engineers

할 수 없다. 이러한 한계를 개선하기 위해 최근 배기가스의 2차원 온도 분포와 농도 분포 산정에 CT-TDLAS(Computed Tomography Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)를 사용하고 있다.^(3~5) 또한, 엔진 배기가스에 대한 2차원 온도 측정에 CT-TDLAS 방법을 적용하였다.^(6~9) 배기가스의 2차원 측정법은 1차원 측정보다 정확한 결과를 유도한다. 또한, Choi 등은 CT-TDLAS를 이용한 2차원 측정 방식의 성능향상을 위한 선폭 함수 최적 계수 연구⁽¹⁰⁾ 및 2R3P 알고리즘 개발⁽¹¹⁾을 하였다. 그러나 실제의 화염 및 배출가스는 균일하게 거동하지 않으므로 두 가지 측정법 모두 물리측정 영역을 표현하는 데 어려움이 있다. 불균일 유동의 정밀 측정을 위해 2차원 CT-TDLAS 기법을 발전시켜 3차원 측정의 필요성이 있다. 이와 유사한 연구로 Yoon 등⁽¹²⁾의 3차원 온도 분포 측정 연구가 있으나 온도 측정에 대한 상대오차가 크며 공급 가스로 사용한 가스(LPG)와 공기의 혼합비의 불안정성으로 인한 열전대와 CT-TDLAS 계측지점 산정의 불확실성을 가지고 있다. 또한, 다층(1st, 2nd layer) 사이의 상관관계를 확인할 데이터 영역이 없으므로 3차원 현상을 보기에 어려움이 따른다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구는 고온 가스의 3차원 온도 측정을 위하여 메탄과 공기의 예혼합 가스를 이용한 연소장치를 구축하였으며, 다층(1st ~ 5th layer) 사이를 잇는 대각선 경로의 레이저 광을 사용함으로써 보다 발전된 3차원 온도 분포 측정기술 구축을 목적으로 삼고 있다.

2. CT-TDLAS 이론

TDLAS 기법은 레이저 광이 대상 가스에 조사될 때 기체 분자가 특정 파장의 빛을 흡수하는 원리를 이용한다. TDLAS 기법을 사용함에 있어 주요 부분은 다이오드 레이저를 사용한 대상 가스의 종류에 따른 작동 파장 범위를 조정함에 있다. 대상 가스의 온도 및 농도에 대한 정보는 측정에 사용한 레이저의 입사광과 투과광의 차이로부터 구할 수 있다.

이러한 관계는 식 (1)의 Lambert Beer's 법칙으로 표현된다.

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

여기서, I_t 는 투과광의 강도, I_0 는 입사광의 강도, A_λ 는 분광 흡광도, P 는 압력, n_i 는 종 i 의 수밀

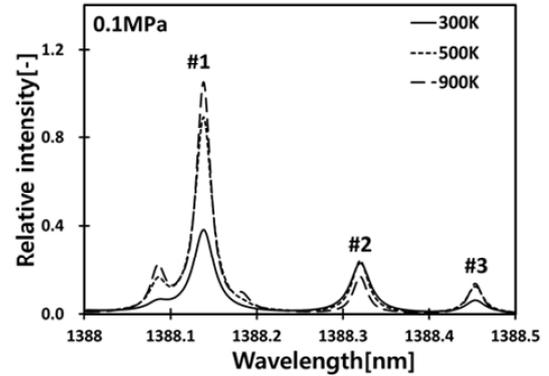


Fig. 1 Relative intensity of theoretical H₂O absorption spectra (1,388 nm~1,388.5 nm)

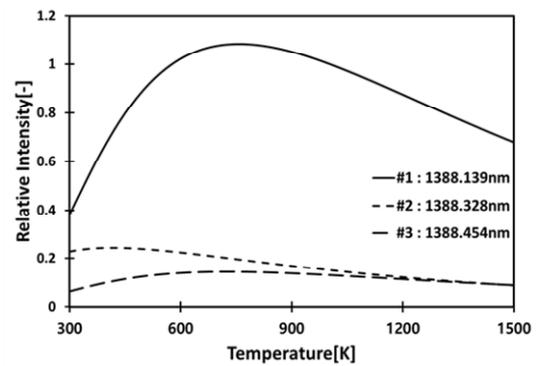


Fig. 2 Temperature dependence of three absorption lines

도, L 은 광학 경로의 길이, $S_{i,j}$ 는 흡수선 j 의 온도에 의존한 흡수 선강도, $G_{v,i,j}$ 는 선폭 확대 함수이다. 특히, $S_{i,j}(T)$ 의 함수는 스위칭 파장과 종에 따른 가스의 온도와 관련이 있다. 확장함수 $G_{v,i,j}$ 는 일반적인 Voigt 프로파일에 의해 근사화되었다.

이 연구에서는 연소환경에서 파장 1,388nm 부근의 H₂O 가스의 고유 흡수 파장을 측정한다. H₂O 가스의 온도와 농도를 측정하기 위해 세 개의 대표 파장을 선택한다. 선택된 파장은 1,388.139nm(#1), 1,388.328nm(#2) 및 1,388.454nm(#3)이다. Fig. 1은 HITRAN 2008 Database⁽¹³⁾를 사용하여 각각 다른 온도(300K, 700K, 1,500K)에서의 흡수 스펙트럼을 보인다.

Fig. 2는 H₂O의 온도 변화에 대한 3개의 주요 파장(#1, #2, #3)의 흡수 강도 프로파일을 보인다.

Fig. 3은 온도 변화에 대한 주 파장 간의 강도 비를 보인다. 강도 비는 온도 증가에 대해 선형성을 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 강도 비는 온도 측정을 위한 CT-TDLAS 계산에 적용 가능하다. 측정 대상의 온도와 농도 분포를 구하기 위해 Fig. 4와 같이 2차원 mesh 형태로 생성된

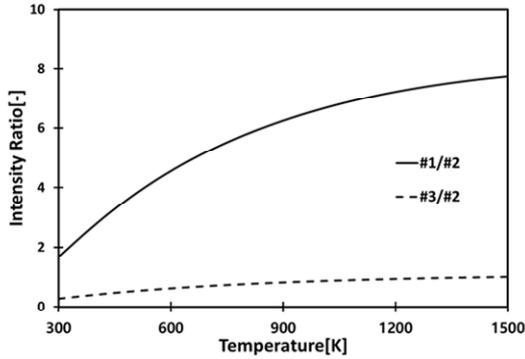


Fig. 3 Theoretical temperature dependence H₂O absorption spectra

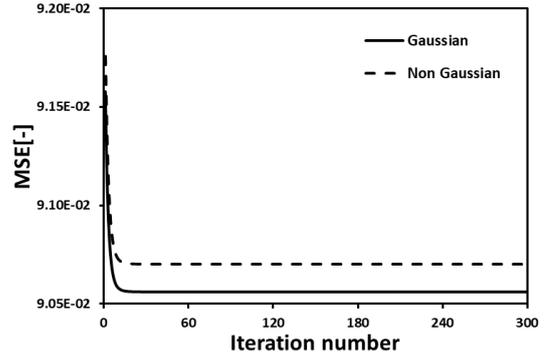


Fig. 5 MSE comparison for initial condition

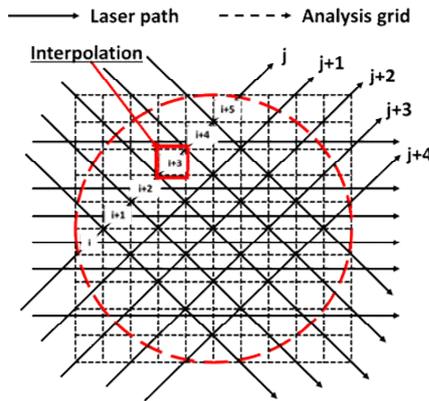


Fig. 4 Tomographic reconstruction method

여러 개의 레이저 빔을 이용하여 이론적으로 각 격자점의 모든 레이저의 강도 정보로 재구성할 수 있다. 또한, 3차원 정보를 재구성하기 위해 2차원 측정 방법을 복수의 층으로 구성하여 사용한다.

식 (2)를 사용하여 모든 그리드 영역에서의 온도와 농도에 대한 흡광도를 계산하며, 경로 j 의 흡수 신호강도로 표현된다.

$$A_{\lambda,j} = -\sum_i n_i \cdot L_{i,j} \cdot \alpha_{\lambda,i} = -\sum_i \left(P \cdot n_i \cdot L_{i,j} \cdot \sum_j S_{i,j}(T) G_{v_i,j} \right) \quad (2)$$

여기서 $A_{\lambda,j}$ 는 j 경로에서의 파장 λ 의 분광 흡광도이며, $L_{i,j}$ 는 그리드 내부 광학 경로의 길이이다. $\alpha_{\lambda,i}$ 는 광학 경로상의 그리드 i 내부 파장 λ 의 흡수계수이며 종의 밀도에 따라 달라진다. 반복 계산은 실험 흡광도와 CT 재구성 흡광도 사이의 차이를 최소화하기 위해 식 (3)의 MSE(Mean Squared Error) 함수를 사용하여 수행한다.

$$Error = \sum \left\{ (A_{\lambda,i})_{theory} - (A_{\lambda,i})_{experiment} \right\}^2 \quad (3)$$

3. 토모그래피 재구성 알고리즘

3.1 초기값 설정 방법

토모그래피 재구성에 있어 초기값 설정 방법은 매우 중요하다. 본 연구에서 CT-TDLAS에 사용할 초기 온도 분포를 SLOS(Summation of Line of Sight) 방법을 사용하여 구성하였다. 하지만, 측정 데이터의 한계에 의한 불균일성이 있으므로 이 문제를 해결하기 위해 Gaussian 분포를 복합 적용하였다. Gaussian 분포는 다음 식 (4)와 같이 계산 가능하다.

$$B_{xyz} = B_{Max} \cdot \exp \left[\frac{-(x^2 + y^2 + z^2)}{\sigma^2} \right] + B_{Min} \quad (4)$$

여기서 B_{Max} 의 최대값은 2.3이며, B_{Min} 의 최소값은 0.8, $\sigma=2$ 이다.

최소온도 300K에서 최대온도 1,200K의 Gaussian 분포를 적용하여 생성한 랜덤 온도 분포에 대하여 초기값 설정에 따른 결과를 Fig. 5에 보인다. SLOS 방법만을 적용한 것에 비하여 SLOS 방법과 Gaussian 분포를 동시 적용한 경우 MSE값이 1.42×10^{-4} 적음으로 보다 효과적이라 할 수 있다.

3.2 SMART 알고리즘

토모그래피 기법 중 하나인 SMART(Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 알고리즘⁽¹⁴⁾으로부터 대수적 재구성 조합 결과를 기반으로 교차 엔트로피 최소화를 만족하는 반복 계산을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 대용량 데이터의 수렴속도를 높이기 위해 식 (5)를 적용하였다.

$$\alpha_{\lambda,i}^{k+1} = \alpha_{\lambda,i}^k \cdot \exp \left(\frac{\sum_{j=1}^J \frac{L_{ij}}{\sum_{i=1}^I L_{ij}} \cdot \log \frac{A_{\lambda,j}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} \cdot L_{ij}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} \cdot L_{ij}} \right) \quad (5)$$

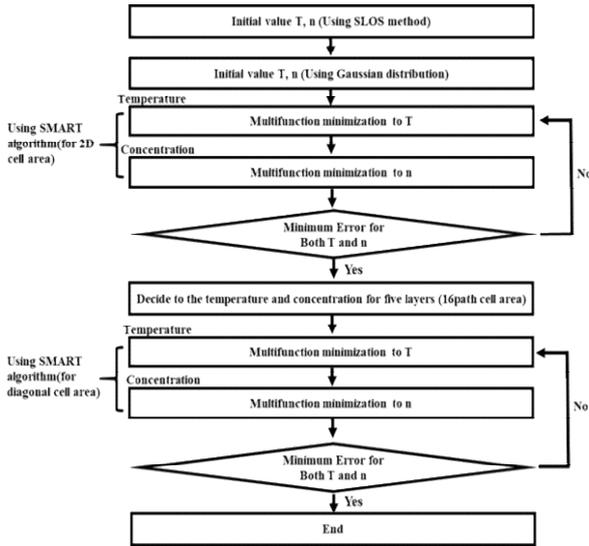


Fig. 6 The calculation process of temperature and concentration at all grids in CT-TDLAS

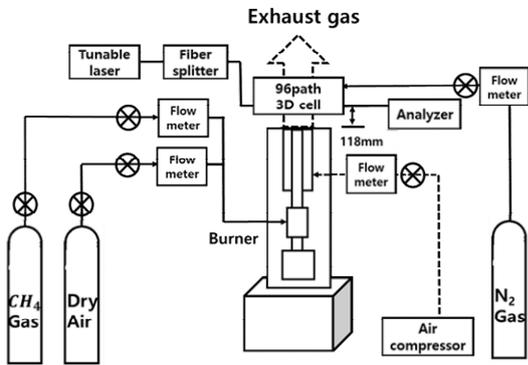


Fig. 7 Experimental apparatus for 3D temperature measurement in flame burner using CT-TDLAS

실험으로부터 측정된 H₂O 흡수 스펙트럼에 CT-TDLAS를 적용하는 절차는 Fig. 6과 같다.

4. 3차원 연소분포 측정

실제 화염을 발생시키는 장치의 시험설정은 Fig. 7과 같다. 버너는 주위의 공기 및 메인 화염의 연료 공급을 위한 이중 튜브 구조를 가진다. 메탄과 공기의 예혼합 가스를 사용하였으며, Fig. 7에 도시된 바와 같이 3차원 CT-TDLAS 측정 셀을 버너로부터 118mm 위치에 설치하였으며, 버너의 내경은 6mm이다. 또한, 버너 주위 공기의 균일한 유동을 위해 3차원 CT-TDLAS 측정 셀의 내경과 같은 70mm를 적용하였다.

시험 조건은 Table 1에 요약되어 있다. 흡수가 발생하지 않는 N₂ 가스 시험을 통해 연소 시 발생하는 실제 흡수선 계산에 적용한다.

Table 1 Experimental parameters

Case	CH ₄ (L/min)	Dry air (L/min)	Surrounding air (L/min)	Inside of 3D cell : N ₂ (L/min)
N ₂ test	-	-	-	55.0
Air test	-	-	25.0	55.0
CH ₄ -air flame	0.24	1.9	25.0	55.0

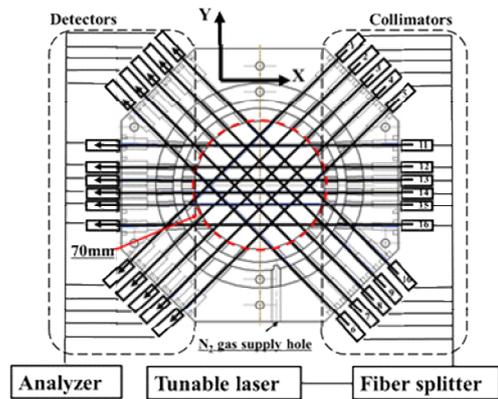


Fig. 8 CT measurement cell for 16 paths

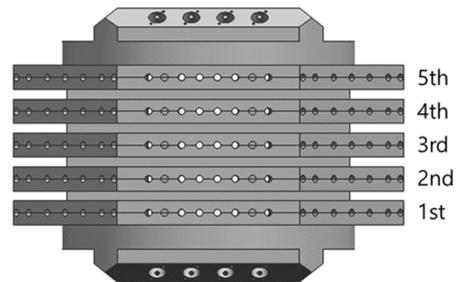


Fig. 9 96 paths CT-TDLAS measurement cell

H₂O 가스 흡수 스펙트럼을 측정하기 위해, 작동 파장이 1,388nm이고 주사율이 0.6nm인 DFB(Distributed Feedback) 레이저(NTT Electronics, Co., NLK1E5GAAA)를 사용하였다. 또한, 동시에 3차원 흡수 스펙트럼을 측정하기 위해 Fig. 8에 도시된 바와 같이 16개의 레이저 경로로 구성된 2차원 측정 셀을 Fig. 9와 같이 5개의 층으로 구성하였으며, 각 층을 동시에 투과하는 대각선 레이저 경로 16개를 동시에 적용하였다.

이를 통하여 2차원 측정 셀을 5개의 층으로 단 순히 적층한 구조에서 각층 사이의 연계정보를 보정하기 위해 각층을 동시에 투과하는 대각선 레이저 경로를 적용하여 보다 신뢰성 있는 공간 정보를 취득할 수 있다.

Fig. 10은 총 96개의 레이저 경로의 구성을 보인

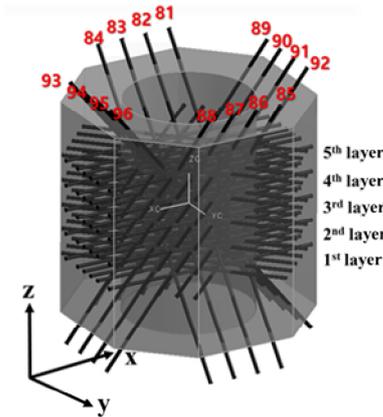


Fig. 10 The entire optical path diagram

다. 레이저 빔은 광섬유 스플리터(OPNETI, CO., PLC-367020-0132-2, 1×32, 2 ea, PLC-367020-0116-2, 1×16, 2 ea)를 사용하여 분배되었으며 96개의 레이저 빔은 96개의 collimator(THORLABS, Co., C-20-S-1-C-200-2-S-2-S)를 통과하여 96개의 광 다이오드(Hamamatsu Photonics, G12180-010A)를 통해 감지되었다. 검출된 신호는 증폭기를 사용하여 증폭되었으며, 4kHz로 스캔되어 레코더(HIOKI E. E., Co., 8826 Memory Highcoda, 2 ea, MR8741 Memory Highcoda, 2ea)로 데이터를 수집하였다. 온도 측정 비교를 위해 K형 열전대(KMG-100-100-050)를 사용하였다.

5. 3차원 온도 측정 결과의 비교

본 연구에서는 3차원 CT-TDLAS를 적용하기 위해 96개의 레이저 빔을 사용하였으며, H₂O 가스의 흡수 스펙트럼을 확인하기 위해 1,388~1,388.6nm 영역을 사용하였다. 특히, 1,388.139nm(#1), 1,388.328nm(#2), 1,388.454nm(#3)에 위치하는 3개의 대표 파장을 온도 및 농도 계산을 위해 선택하였다. Fig. 11~15는 열전대 시험에 의해 측정된 각 층별 2차원 온도 분포를 보인다.

열전대에 의해 각 층의 중점으로부터 3.5mm 간격으로 3차원 CT-TDLAS 측정에 사용한 레이저 빔의 격자 교차점 위치를 고려하여 측정하였다. 버너의 위치가 3차원 측정 셀의 중심과 같으므로 중앙영역에서 온도가 전체 층에서 모두 상대적으로 높음을 알 수 있다. 또한, 각 층별 높이에 따라 1층에서 5층으로 갈수록 온도가 낮아지는 것이 확인 가능하다.

열전대 측정조건과 동일한 조건에서 3차원 CT-TDLAS 시험을 수행하여 측정 방법에 따른 온도 측정 결과를 비교하였다. Fig. 16~20은 Y=0mm에서

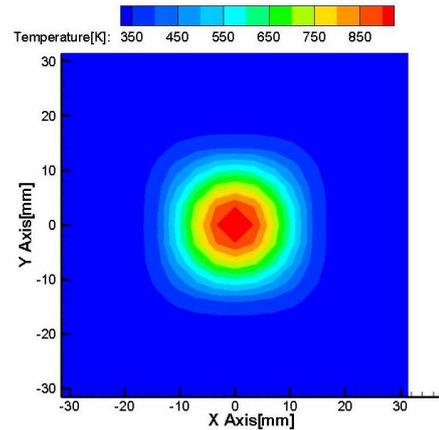


Fig. 11 Temperature distribution measured by thermocouple (1st layer)

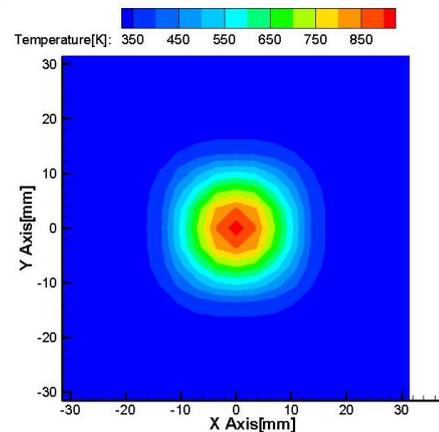


Fig. 12 Temperature distribution measured by thermocouple (2nd layer)

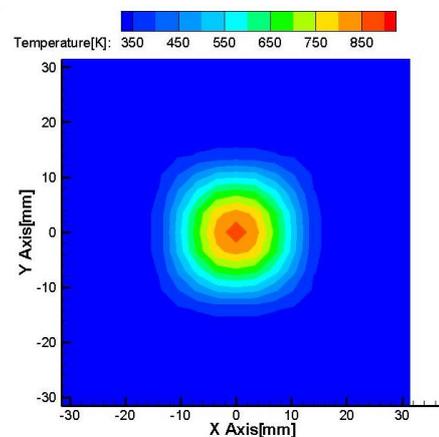


Fig. 13 Temperature distribution measured by thermocouple (3rd layer)

각 층별 온도 비교 결과를 보인다.

열전대와 3차원 CT-TDLAS의 온도 분포를 비교하면 -10mm에서 10mm 영역에서는 거의 동일한 값을 나타내며, 버너의 중심부에서 멀어질수록 오

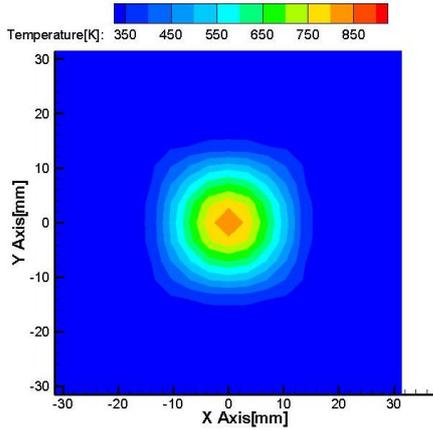


Fig. 14 Temperature distribution measured by thermocouple (4th layer)

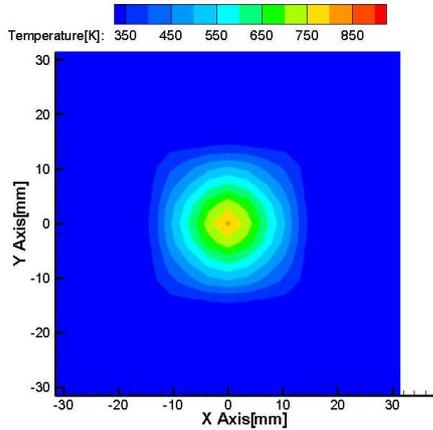


Fig. 15 Temperature distribution measured by thermocouple (5th layer)

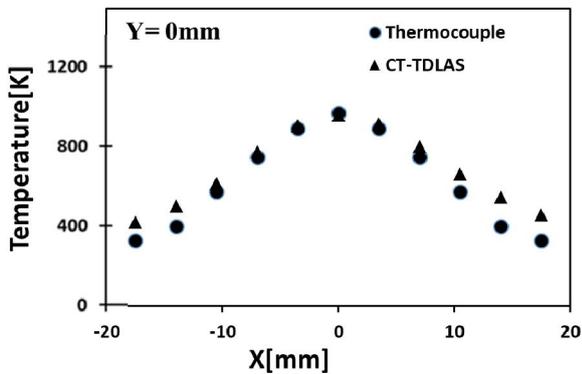


Fig. 16 Comparisons of temperature distribution at Y = 0 mm calculated by the SMART algorithm of CT-TDLAS and measured by the thermocouple (1st layer, Z = 28 mm)

차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 오차의 요인은 레이저 경로의 구성에 있어 중심부보다 외곽 지역의 해상도가 낮음으로 나타나는 현상으로 보인다.

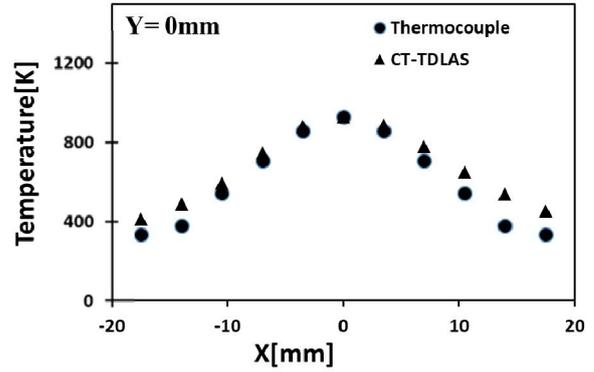


Fig. 17 Comparisons of temperature distribution at Y = 0 mm calculated by the SMART algorithm of CT-TDLAS and measured by the thermocouple (2nd layer, Z = 14 mm)

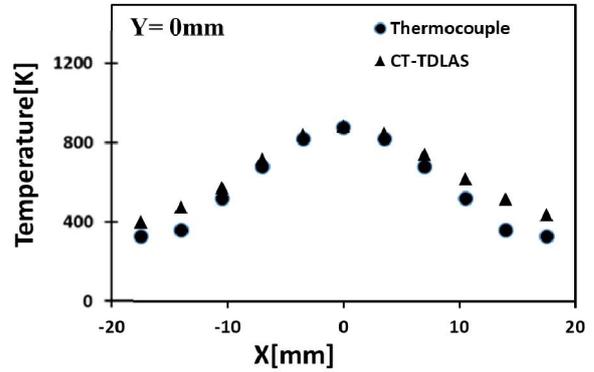


Fig. 18 Comparisons of temperature distribution at Y = 0 mm calculated by the SMART algorithm of CT-TDLAS and measured by the thermocouple (3rd layer, Z = 0 mm)

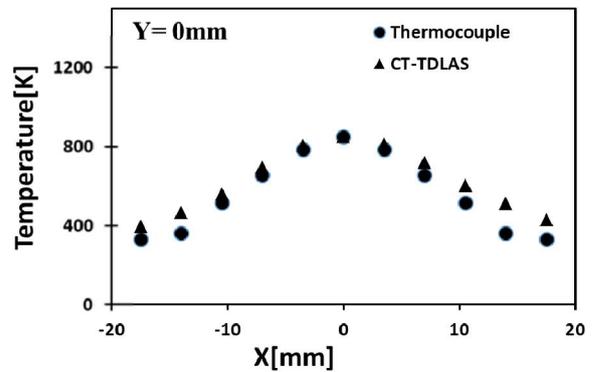


Fig. 19 Comparisons of temperature distribution at Y = 0 mm calculated by the SMART algorithm of CT-TDLAS and measured by the thermocouple (4th layer, Z = -14 mm)

또한 열전대와 CT-TDLAS로 측정된 모든 층(최소온도 330K, 최대온도 976K)의 온도를 비교한 결과 평균 상대오차가 19.7K로 측정되었다.

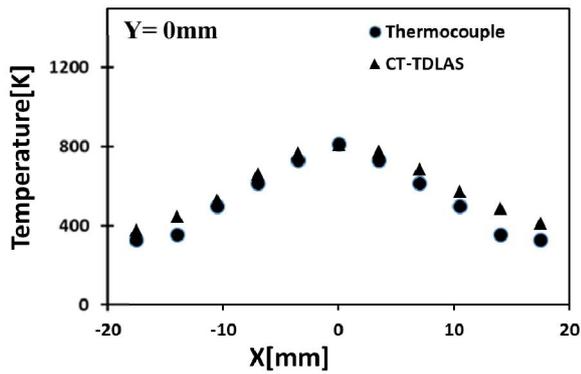


Fig. 20 Comparisons of temperature distribution at Y=0 mm calculated by the SMART algorithm of CT-TDLAS and measured by the thermocouple (5th layer, Z = -28 mm)

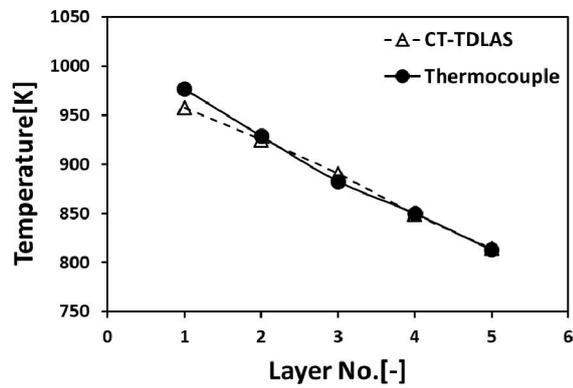


Fig. 21 Comparison result with thermocouple and CT-TDLAS (1~5th layers)

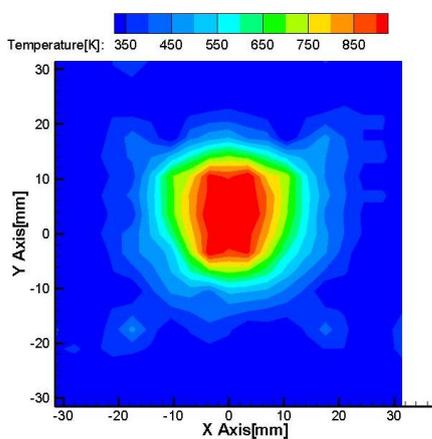


Fig. 22 Reconstructed results of temperature field (1st layer)

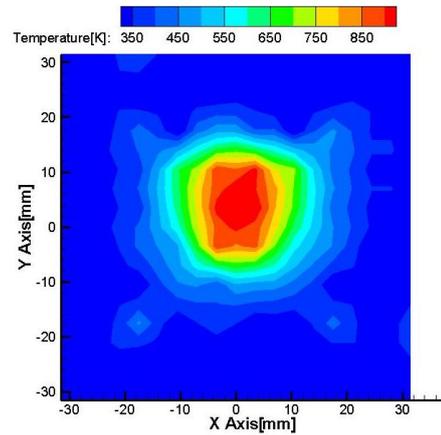


Fig. 23 Reconstructed results of temperature field (3rd layer)

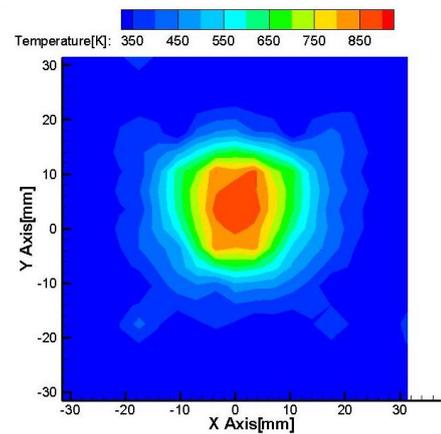


Fig. 24 Reconstructed results of temperature field (5th layer)

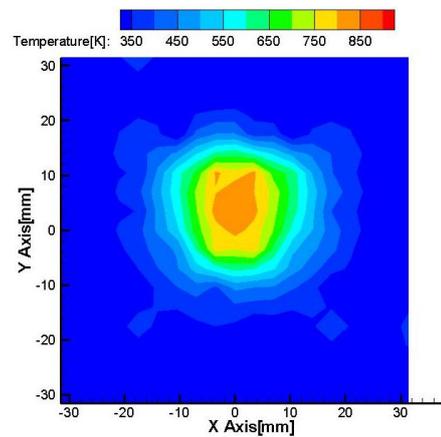


Fig. 25 Reconstructed results of temperature field (3rd layer)

각 층별 중심부 온도를 열전대와 3차원 CT-TDLAS로 비교한 결과를 Fig. 21에 보인다. 저층에 비해 고층에서 상대적으로 오차가 커짐을 확인할 수 있으며, 이는 연소의 불안정성을 시사함을 확인할 수 있다.

Fig. 22~26은 SMART 알고리즘을 이용한 3차원 CT-TDLAS 온도 분포에 대해 각 층의 결과를 시각화하여 보인다. 열전대로 측정된 결과와 같이 버너의 중앙부가 높은 온도를 보이며, 저층에서 고층으로 갈수록 온도가 낮아짐을 확인할 수 있다.

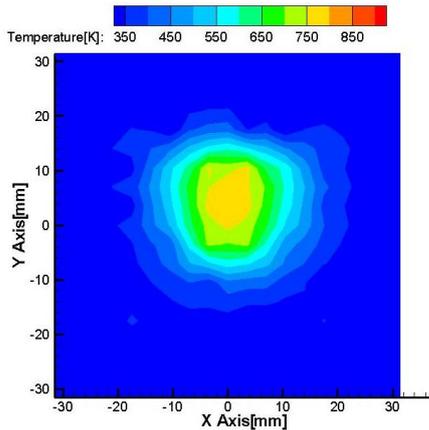


Fig. 26 Reconstructed results of temperature field (5th layer)

6. 결 론

메탄-공기 예혼합화염의 3차원 온도 분포는 CT-TDLAS 시스템에 의해 수행되었다. 이 연구 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 3차원 CT-TDLAS 계산에 있어 중요한 초기 조건을 충족시키기 위해 SLOS 방법과 Gasussian 분포를 동시 적용하였으며, 적합성을 확인할 수 있었다.

(2) 열전대와 3차원 CT-TDLAS를 이용한 온도 측정 결과 전체 층(최소온도 330K, 최대온도 976K)에서의 온도의 평균 상대오차가 29.7K로 매우 근사하게 나타났으며, 최대 81.6K로 측정되었다. 특히 저층에서 고층으로 갈수록 온도의 평균 상대오차가 크게 나타남을 확인할 수 있었으며, 이는 연소의 불안정성을 시사함을 확인할 수 있었다.

(3) 본 연구에서는 실제 화염의 3차원 온도 측정에 CT-TDLAS의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견핵심과제(No. 2017R1A2B2010603), 산업통상자원부의 국가혁신 클러스터사업 R&D 사업(P0006900), 중소벤처기업부에서 지원하는 산학연협력 기술개발사업(No. S2652733)의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌 (References)

(1) Fine, G. F., Cavanagh, I. M., Afonja, A. and Binions, R., 2010, "Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring," *Sensors*, Vol. 10, pp. 5469~5502.

- (2) Wang, W., Lim, C. B., Lee, K. K. and Yang, S. S., 2009, "Wireless Surface Acoustic Wave Chemical Sensor for Simultaneous Measurement of CO₂ and Humidity," *J. Micro/Nanolith., MEMS, and MOEMS*, Vol. 8, No. 3, Paper No. 031306.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Deguchi, Y., Yasui, D. and Adachi, A., 2012, "Development of 2D Temperature and Concentration Measurement Method using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy," *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 2, No. 9, pp. 543~549.
- (7) Wang, F., Cen, K. F., Li, N., Jeffries, J. B., Huang, Q. X., Yan, J. H. and Chi, Y., 2010, "Two-Dimensional Tomography for Gas Concentration and Temperature Distributions based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 4, p. 21.
- (8) Ma, L. and Cai, W., 2008, "Numerical Investigation of Hyperspectral Tomography for Simultaneous Temperature and Concentration Imaging," *Applied Optics*, Vol. 47, No. 21, pp. 3751~3759.
- (9) 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.
- (10) Choi, D. W., Cho, G. R., Deguchi, Y., Back, T. S. and Doh, D. H., 2016, "Study on Optimal Coefficients of Line Broadening Function for Performance Enhancements of CT-TDLAS," *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 6, pp. 773~782.
- (11) Choi, D. W., Cho, G. R., Shim, J. H., Deguchi, Y., Kim, D. H. and Doh, D. H., 2016, "2D Temperature Measurement of CT-TDLAS by Using Two-Ratios-of-Three-Peaks Algorithm," *Trans. of Korean Hydrogen*

- and New Energy Society*, Vol. 27, No. 3, pp. 318~327.
- (12) Yoon, D. I., Kim, J. H., Jeon, M. G., Choi, D. W., Cho, G. R. and Doh, D. H., 2018, "Calculating of 3-Dimensional Temperature Distribution for High-Temperature Exhaust Gas Using CT-TDLAS," *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 1, pp. 97~104.
- (13) Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Chris Benner, D., Bernath, P. F., Birk, M., Boudon, V., Brown, L. R., Campargue, A., Champion, J.-P., Chance, K., Coudert, L. H., Dana, V., Devi, V. M., Fally, S., Flaud, J.-M., Gamache, R. R., Goldman, A., Jacquemart, D., Kleiner, I., Lacombe, N., Lafferty, W. J., Mandin, J.-Y., Massie, S. T., Mikhailenko, S., Miller, C. E., Moazzen-Ahmadi, N., Naumenko, O. V., Nikitin, A., Orphal, J., Predoi-Cross, A., Perevalov, V., Perrin, A., Rinsland, C. P., Rotger, M., Simeckova, M., Smith, M. A. H., Sung, K., Tashkun, S., Tennyson, J., Toth, R. A., Vandaele, A. C. and Vander Auwera, J., 2009, "The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 110, pp. 533~572.
- (14) Jeon, M. G., Doh, D. H., Deguchi, Y. and Kamimoto, T., 2019, "Evaluation of 3D Measurement using CT-TDLAS," *Modern Physics Letters B*, Vol. 33, No. 14n15, pp. 1~5.