

CT-TDLAS를 이용한 고온 배기가스의 3차원 온도분포 측정

윤동익¹ · 김준호² · 전민규³ · 최두원⁴ · 조경래^{4,†} · 도덕희^{4,†}

¹한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과, ²한국해양대 대학원 해양과학기술융합학과, ³도쿠시마 대학교 첨단과학기술대학원, ⁴한국해양대학교 기계공학부

Calculating of 3-Dimensional Temperature Distribution for High-Temperature Exhaust Gas Using CT-TDLAS

DONGIK YOON¹, JOONHO KIM², MINGYU JEON³, DOOWON CHOI⁴, GYEONGRAE CHO^{4,†}, DEOGHEE DOH^{4,†}

¹Division of Refrigeration & Air-conditioning Eng., Graduate School of Korea Maritime & Ocean University, 7727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

²Division of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Graduate School of Korea Maritime & Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

³Division of Advanced Technology and Science, Graduate School of Tokushima University, 2-1, Minamijyosanjima, Tokushima 770-8506, Japan

⁴Division of Mechanical Eng., Korea Maritime & Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

[†]Corresponding author :

Doh@kmou.ac.kr

vpascal@kmou.ac.kr

Received 26 January, 2018

Revised 23 February, 2018

Accepted 28 February, 2018

Abstract >> 3-dimensional temperature distribution of the exhaust gas of a fire flame of LPG have been measured by the constructed CT-TDLAS system. 3-Dimensional temperature distributions are measured by 2 layers of CT-TDLAS. Each layer has 8x8 laser beams implying the temperatures of 64 meshes are measured. SMART algorithm has been adopted for reconstructing the absorption coefficients on the meshes. The line strengths at 6 representative wave lengths of H₂O have been used for obtaining the absorption spectra of the exhaust gas. The temperature distributions measured by the constructed CT-TDLAS have been compared with those by the thermocouples. The relative errors measured between by thermocouple and CT-TDLAS were 13% in average and 33% at maximum. The similarity of temperature distribution between by thermocouples and by CT-TDLAS has been shown at the lower layer than the upper layer implying an unstability of combustions.

Key words : Computed tomography(컴퓨터단층촬영), Exhaust gas(배기가스), Temperature distribution(온도분포), 3-dimensional measurement (3차원 측정), TDLAS(레이저 흡수 분광법)

1. 서 론

1992 EURO 1로부터 시작하여 최근 발효된

EURO 6은 2015년부터 국내에 적용되었다. EURO 6 규정에 의하면 대형경유차의 경우 질소산화물(NOx)을 EURO 5단계(2.0 kWh)의 1.5수준인 0.4 gWh까지만

허용한다. 이에 따라 EURO 6 기준을 맞추려면 신형 엔진을 장착하거나 exhaust gas recirculation (EGR), selective catalytic reduction (SCR)과 같은 별도의 공해저감장치를 추가해야 하기 때문에 원가에 상당한 부담이 된다. 자동차뿐만 아니라 선박 같은 경우 국제해사기구인 IMO의 Tier III 규정에 따라 2016년부터는 질소산화물 배출량을 최대 3.4 g/kWh 미만으로 규정하고 있으며 이는 Tier I 대비 80%가 저감된 수준으로서, 세계는 이를 극복하기 위한 다양한 기술개발에 임하고 있다. 가스의 배출량 산정을 위해서는 가스의 농도산정이 필수적이며 이를 위해서는 가스온도 측정이 수반되어야 한다.

한편, 배기가스의 온도 혹은 농도를 측정하는 방식은 점촉식, 1점(pointwise) 측정방식인데 이는 정확한 측정방식이라 볼 수 없다. 엔진 배기관에서 측정시 직경이 커서 가스농도가 불균일한 상태로 배출되는데 이때 1점 센서로만 측정하게 되면 전체농도가 아닌 1점의 농도이므로 정확한 측정법이라 할 수 없다.

한편, computed tomography tuneable diode laser absorption spectroscopy (CT-TDLAS)는 배기가스의 2차원 온도분포와 농도분포를 산정이 가능한데, 이 기술은 가스 분자가 특정 파장대에서 온도에 따라 흡수강도가 변하는 특성을 이용한다¹⁻⁴⁾. 하지만 연소상태를 진단에 있어서는 2차원 단면상에서의 온도분포보다는 3차원 공간상의 온도분포가 보다 실용적이다. 본 논문은 고온가스의 3차원 온도분포 측정이 가능한 3차원 CT-TDLAS 기술 구축에 관한 내용기술을 목적으로 삼고 있다. 선행 연구³⁾에서는 1개의 2차원 단면상 셀(cell)을 이용하여 2차원 평면의 온도분포를 얻었지만 본 연구에서는 복층의 3차원 셀을 구성하여 3차원 온도분포를 측정하였다.

2. CT-TDLAS 이론

2.1 Lambert-Beer 법칙

Lambert-Beer 법칙⁵⁾에 의거한 CT-TDLAS에 관

한 이론적 전개는 이미 많은 선행 연구¹⁻⁴⁾에 있어서 잘 기술되어 있으나 본 논문에서는 독자이해의 용이성 제공을 위하여 간략히 재기술하면 다음과 같다. 빛이 가스매질을 통과할 때 입사광과 투사광의 비는 매질의 두께, 흡수계수, 흡수선의 길이에 비례한다는 Lambert-Beer 법칙⁵⁾에 기반한 측정시스템이며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} = - \sum_i (n_i \alpha L) - \sum_i (n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{Vi,j}) \quad (1)$$

i는 가스 종류, j는 레이저, λ 는 파장을 의미하고, I_{λ} 는 투과광의 강도, $I_{\lambda 0}$ 는 입사광의 초기강도를 나타내고 n_i 는 i종 기체의 수밀도(number density), α 는 흡수계수, L은 흡수선길이를 나타낸다. 여기서 흡수계수 α 는 선강도 $S_{i,j}(T)$ 와 선폭함수 $G_{Vi,j}$ 의 곱의 합으로 나타낼 수 있고 $G_{Vi,j}$ 는 실험을 통해 얻을 수 있는 값이다.

2.2 선강도(line strength)

선강도⁶⁾는 온도함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S(T) = S_v(T_0) \frac{T}{T_0} \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left[\frac{1 - \exp(-\frac{hcV_{0,v}}{kT})}{1 - \exp(-\frac{hcV_{0,v}}{kT_0})} \right] \times \exp \left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 h는 플랑크상수 6.6256×10^{-27} (erg · K), k는 볼츠만 상수 1.38054×10^{-16} (erg/K), c는 빛의 속도 3.0×10^{10} (cm/s)이다. T_0 는 표준온도 296 K, V_0 (cm^{-1})는 파수(wavenumber)로 실험시 선택 선택하는 파장대의 값이므로 이들 또한 알고 있는 값이다. E'' 는 저준위 에너지, Q(T)는 분배함수를 의미한다. 저준위 에너지와 분배함수에 대한 정보는 하버드대학에서 제공하는 HITRAN database 2008⁶⁾로부터 얻을 수 있다. 분배함수식은 식 (3)과 같으며 각 계수

Table 1. Coefficients of the polynomial expression for the partition of H₂O

	70<T<500 K	500<T<1,500 K	1,500<T<3,005 K
a	-0.44405×10^1	-0.94327×10^2	-0.11727×10^4
b	0.27678×10	0.81903×10	0.29261×10^1
c	0.12536×10^{-2}	0.74005×10^{-4}	-0.13299×10^{-2}
d	-0.48938×10^{-6}	0.42437×10^{-6}	0.74356×10^{-6}

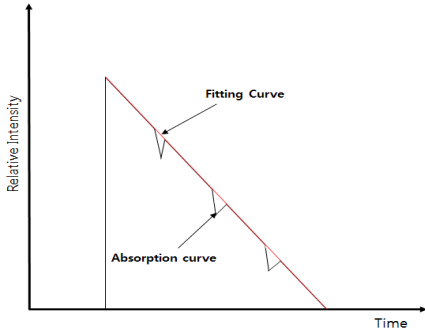


Fig. 1. Profile of the absorption spectral data

의 값들은 Table 1⁷⁾과 같이 정의된다.

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (3)$$

이렇게 구해진 선강도 값을 이용하여 흡수계수(α)를 구할 수 있고 이를 식 (1)에 적용하여 개수밀도 n 을 산정하고 농도로 변환할 수 있다.

2.3 흡수선 데이터 처리

Fig. 1은 CT-TDLAS를 이용하여 측정한 흡수선 형상이다. 발진된 레이저는 매질 통과 시 특정 파장에서 흡수가 되고, 이로 인해 해당 파장에서 측정되는 신호값(voltage)이 줄어든다. 이 흡수선 그래프에 curve fitting을 실시하여 추세선을 얻고 이 추세선을 이용하여 원래의 신호를 분리해 내면 Fig. 2와 같은 흡수 스펙트럼을 얻었다. 이와 같은 흡수 스펙트럼은 온도 변화에 따라 변화하는 관계로 모든 흡수 스펙트럼을 이용하여 온도를 산정하였다.

본 연구에서는 연소시 발생하는 수증기(H₂O)의 온도와 농도분포를 측정하기 위해 수증기에 대한 흡수반

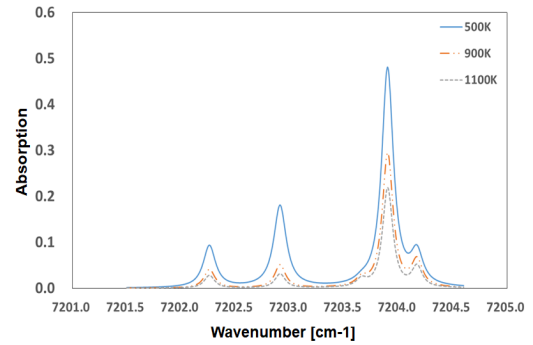


Fig. 2. Profiles of H₂O absorption spectra for three temperature (500 K, 900 K, 1,100 K) at 1,388.0-1,388.6 nm

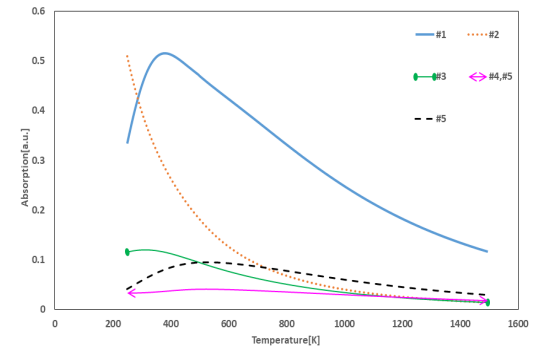


Fig. 3. Temperature dependence of six representative absorption lines

응이 잘 일어나는 1,388.0-1,388.6 nm의 파장대의 레이저를 사용하였다. 사용된 레이저 파수(wavenumber)의 범위는 7,201.49-7,204.61 cm⁻¹이며 이 중 온도에 따른 반응성이 큰 6개의 파수들(7,204.16 cm⁻¹, 7,203.91 cm⁻¹, 7,203.90 cm⁻¹, 7,203.66 cm⁻¹, 7,202.91 cm⁻¹, 7,202.25 cm⁻¹)을 대표 파수로 선정하고 본 논문에서는 이를 각각 #1, #2, #3, #4, #5, #6이라 표기한다.

Fig. 3은 이들 6개의 대표파장에서의 HITRAN database⁶⁾로부터 얻은 온도변화에 따른 이론상 흡수 스펙트럼의 변화를 나타낸다.

2.4 재구성 알고리즘

흡수 스펙트럼으로부터 얻어진 온도데이터는 하나의 경로(path)에 대한 온도 결과인 관계로 이 경로 상에 누적된 신호만으로 온도분포를 산정할 수 없

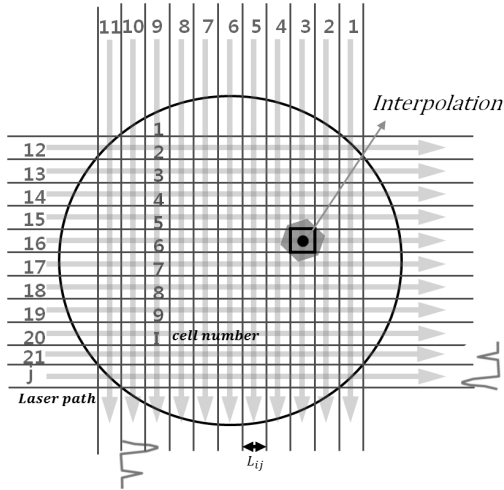


Fig. 4. Arrangements of analysis grid and laser paths

다. 그런 연유로 Fig. 4에서 보이는 것처럼 가로, 세로 레이저가 교차하는 각 교점에서의 온도를 산정하기 위해서는 computed tomography (CT)의 재구성 알고리즘을 이용하여 온도분포로 재구성한다. 본 연구에서 사용된 재구성 알고리즘은 식 (4)로 나타나는 SMART법^{8,9)}을 적용하였다.

$$\alpha_{\lambda,i}(i)^{k+1} = \alpha_{\lambda,j}(i)^{(k)} \times \sum_{i=1}^{N_i} \left[\left(\frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^i \alpha_n^k \cdot L_{i,j}} \right)^{\beta L_{ij}} \right]^{1/N_i}$$

(i = 1, 2, ..., I) (4)

α 는 흡수계수, A 는 흡수량, L 은 흡수선의 길이, i 는 레이저번호, j 는 셀 번호, λ 는 해당파장을 의미한다. β 는 수렴속도에 영향을 주는 가중치이다. 실험으로부터 얻어진 흡수 스펙트럼의 흡수량과 이론상 흡수 스펙트럼의 흡수량을 비교하여 오차가 최소화될 때까지 반복계산을 수행하였다.

3. 연소실험 및 결과

3.1 실험장치 및 방법

CT-TDLAS의 실험 개략도는 Fig. 5와 같다. 함수

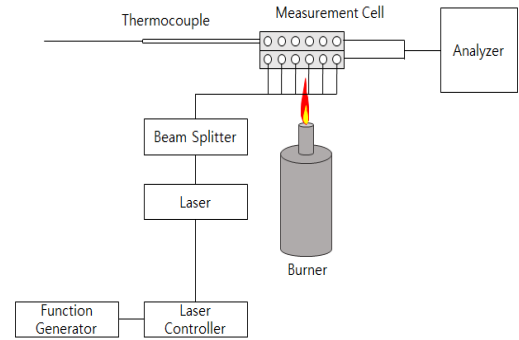


Fig. 5. Schematic of CT-TDLAS

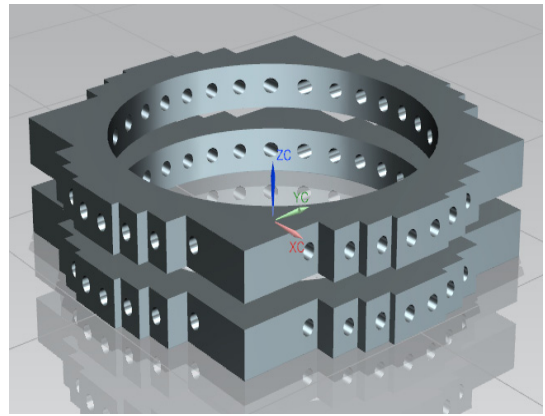


Fig. 6. Experimental cell

발생기에서 발생한 신호는 LD controller를 거쳐 Laser Diode (NLK1B5EAAA)로 전달되고 splitter를 통해 32개의 collimator로 분배된다. 분배된 레이저는 연소장을 지나면서 측정 대상 가스인 H_2O 에 의해 흡수반응을 일으키고 이 흡수신호는 Photodetector (G12180-010A)에 의해 측정되고 계측기로 전달된다. 연소장 실험을 위하여 LPG 버너를 이용하였고 균일한 연소상태를 유지하기 위해 연소시 공기와 LPG를 일정비로 유지하였다. 연소장의 측정 온도범위는 300-800 K로 설정하였다.

본 연구에서 사용된 레이저 주파수는 1 kHz이고 발진용 파형은 흡수선의 curve fitting에 용이한 톱니파(sawtooth)로 설정하였다. 3차원 계측을 위해 Fig. 6과 같이 측정셀을 적층하였으며 측정영역의 간격은 15 mm이다. 각 층의 레이저 배열은 8×8 lines (16 paths)로 구성하였으며 측정영역의 직경은 80 mm이

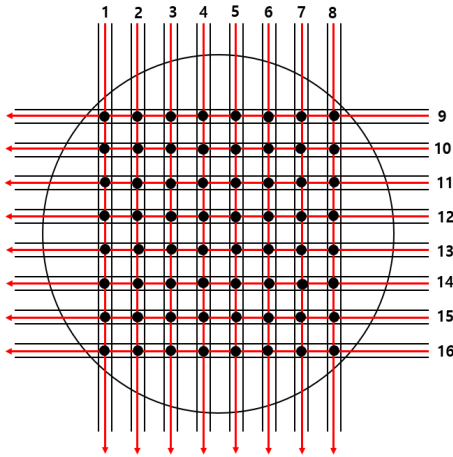


Fig. 7. Locations for thermocouples measurements

다. CT-TDLAS의 온도측정 성능평가를 위해 Fig. 7에서 보이는 것처럼 64개의 레이저 교차점에서 thermocouple에 의한 온도측정을 실시하였고, 그 결과를 CT-TDLAS에 의한 산정 결과와 비교하였다. Thermocouple에 의한 온도 측정시 가스의 미세한 움직임에 의한 영향을 고려하기 위하여 5회 반복 측정에 의한 평균 온도값들을 thermocouple에 의한 온도값으로 간주하였다. 반복 측정된 온도의 표준 편차는 1층 및 2층에서 각각 1-55 K, 2-24 K로 나타났다.

3.2 3차원 CT-TDLAS 산정 결과

Fig. 8과 Fig. 9는 CT-TDLAS에 의하여 산출된 각 층에서의 온도분포를 나타낸다. X, Y축은 측정 영역의 범위를 나타내고 첫 번째 층에서 측정된 온도범위는 312-774 K, 두 번째 층에서 측정된 온도범위는 311-783 K로 나타났는데 거의 유사한 온도측정 범위를 가졌음을 확인되었다. 두 번째 층의 중심부 온도가 첫 번째 층보다 높은 온도를 보였는데, 고온부에서 CT-TDLAS 계측오차가 나타나는 특성에 의한 것으로 보인다. 화염이 중심에 위치함에 따라 중심부의 온도가 가장 높게 계측되었으며 가장자리로 갈수록 온도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

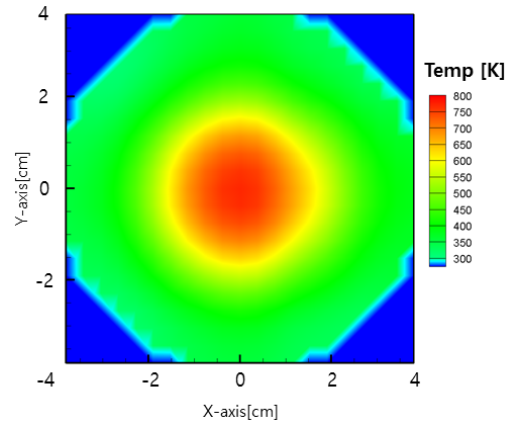


Fig. 8. Temperature distribution at 1st layer

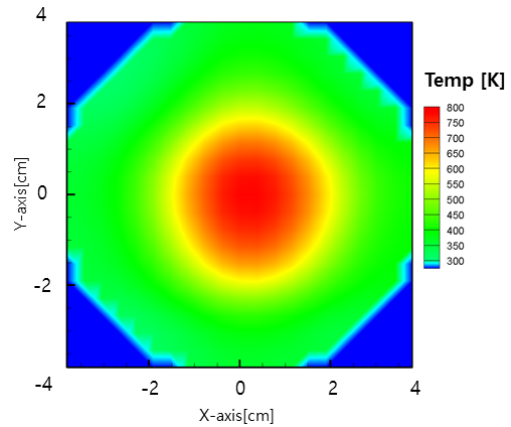


Fig. 9. Temperature distribution at 2nd layer

Fig. 10와 Fig. 11은 산정된 온도분포를 3차원 형태로 표시한 것인데, 가우시안(Gaussian) 온도분포를 보이고 있는 것으로 보아 배기가스는 층류(laminar)로서 정상상태(steady state)를 유지하고 있음을 추론할 수 있다.

3.3 측정 결과 분석

CT-TDLAS의 측정 성능을 평가하기 위해 식 (5)로 나타낼 수 있는 64개의 지점에서 thermocouple에 의한 온도측정 결과와 비교하였다.

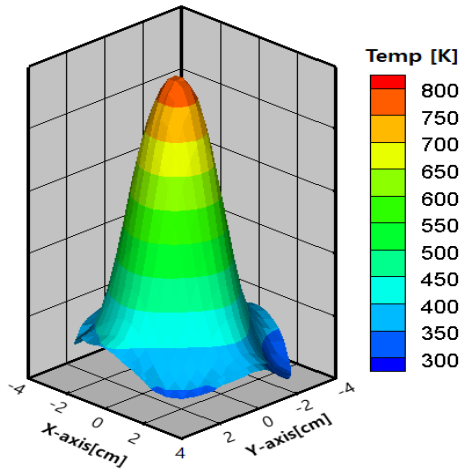


Fig. 10. 3D temperature distribution at 1st layer

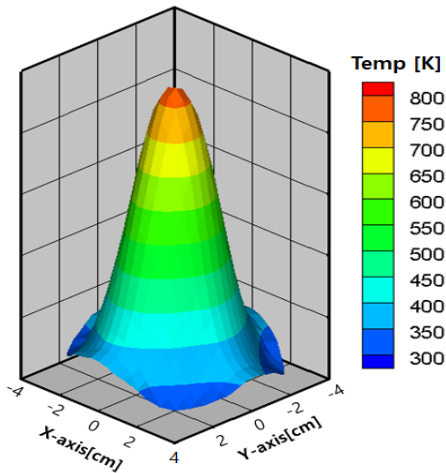


Fig. 11. 3D temperature distribution at 2nd layer

$$T_i = T_{CT-TDLAS} - T_{Thermocouple} \quad (i = \text{each cross section points}) \quad (5)$$

각 교점에서 CT-TDLAS와 thermocouple로 산정된 온도값의 차이는 각층에서 각각 Fig. 12와 Fig. 13과 같다. 첫 번째 층에서 온도차 범위는 -13-108 K였고, 두 번째 층에서의 온도차 범위는 -14-159 K로 나타났다. 두 측정법에 의한 온도차에 대한 정량적인 평가를 위해 식 (6)으로 정의되는 상대오차율을 계산하였다. $T_{CT-TDLAS}$ 는 CT-TDLAS에 의해 측정된

(unit: K)

10	18	13	17	25	21	17	19
33	45	28	29	41	38	30	35
62	78	49	19	41	64	58	55
82	107	71	-9	-13	40	64	61
77	96	87	30	18	59	87	72
57	76	108	103	89	81	85	64
25	48	83	97	88	67	62	39
2	20	47	61	57	39	27	14

Fig. 12. Temperature deviations for each points at 1st layer

(unit: K)

5	-5	-14	3	16	23	11	23
26	12	-2	33	66	75	42	43
39	24	19	47	90	123	87	65
59	55	53	43	62	124	113	83
52	45	72	93	112	159	142	96
39	33	74	125	144	151	116	76
14	19	59	104	115	103	72	43
-1	7	40	72	78	67	42	25

Fig. 13. Temperature deviations for each points at 2nd layer

온도값, $T_{Thermocouple}$ 은 thermocouple에 의해 측정된 값으로 최대 33%의 상대오차율을 가졌고 평균 오차율은 13%로 나타났다.

$$\text{Error Rate} [\%] = \left| \frac{T_{CT-TDLAS} - T_{Thermocouple}}{T_{Thermocouple}} \right| \times 100 \quad (6)$$

고온부에서 CT-TDLAS와 thermocouple의 온도 분포의 유사성(similarity)을 비교하기 위하여 식 (7)로 정의되는 정규화(normalization)온도를 계산하였다.

$$T_{n,i} = \frac{T_i - E(T)}{\sigma_T} \quad (7)$$

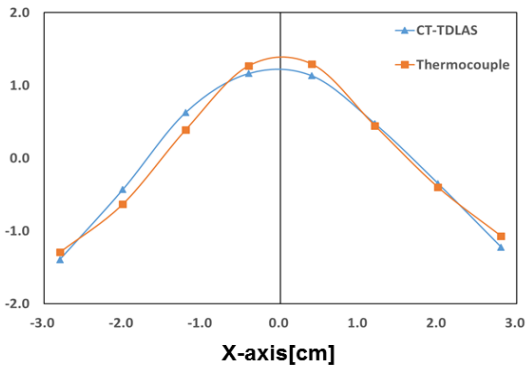


Fig. 14. Profiles of the normalization temperature for 1st layer

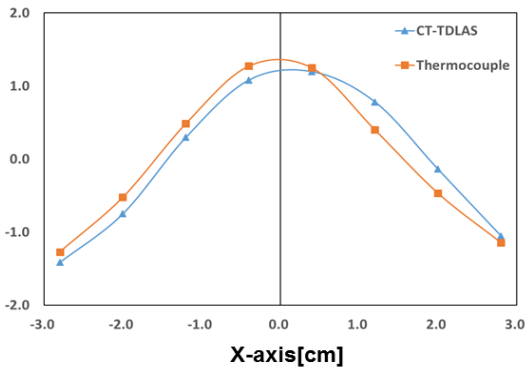


Fig. 15. Profiles of the normalization temperature for 2nd layer

여기서, T_i 는 각 교점에서의 온도, $E(T)$ 는 온도의 평균값, σ_T 는 온도의 표준편차이다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각 층에서의 축 중앙선상에서의 온도들을 정규화하여 나타낸 온도분포를 나타낸다. 1층에서는 거의 유사한 분포패턴을 보이나 2층에서는 위치에 따라 약간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 차이는 크게 CT-TDLAS의 측정 위치 점과 thermocouple의 측정위치점 불일치에 의한 것 또는 화염의 중심이 연소되는 과정에서 주위 기류에 의하여 조금씩 흔들리는 현상에 의한 것으로 풀이된다.

4. 결론

CT-TDLAS을 이용한 3차원 온도분포 측정을 수행하는 과정에서 다음과 같은 결론으로 정리된다.

1) CT-TDLAS에 의한 3차원 온도분포를 측정할 수 있는 측정시스템을 구축하였다.

2) Thermocouple 측정에 의한 온도측정 결과와 구축된 CT-TDLAS에 의한 온도측정에서의 상대오차는 평균 13%였다.

3) 하부 단면에서의 온도분포는 상부 단면에서의 온도분포보다 정규화 온도분포에 가까웠는데, 이는 상부 단면에서의 배기가스 온도분포의 불안정성을 시사한다. 다시 말하면, 화염은 상부로 갈수록 불안정성을 가지게 됨을 시사한다.

한편, CT-TDLAS에 의한 3차원 온도분포 측정에 있어서 thermocouple에 의한 측정 결과와의 오차원인으로서 다음과 같이 추정되었다.

1) 공급되는 가스(LPG)비와 공기의 혼합비의 간헐적 불안정성에 의하여 연소상태가 일정하게 유지되지 않을 수 있다는 점.

2) HITRAN database에서 제공하는 이론적 흡수 스펙트럼 값과 본 실험 환경에서의 실험적 흡수 스펙트럼 값과의 불일치에 따른 CT-TDLAS에 의한 온도산정값에 불확실성이 포함될 수 있다는 점.

3) 388 nm 파장대에서 고온부(700 K 이상)로 갈수록 흡수 스펙트럼의 반응성이 떨어짐으로 인한 온도산정 값에 불확실성이 포함될 수 있다는 점.

4) Thermocouple 계측지점과 CT-TDLAS 계측지점 산정에 불확실성이 포함될 수 있다는 점.

후 기

본 연구는 한국연구재단 중견핵심과제(No.2015R1A2A2A01006803), 지역혁신창의인력양성사업(No.2015H1C1A1035890), 중견연구자지원사업(No.2017R1A2B2010603), 중소중견기업지원사업 WC300 R&D(S2415805)의 지원에 의하여 수행되었다.

References

1. T. Kamimoto, Y. Deguchi, and Y. Kiyota, "High temperature field application of two dimensional temperature measure-

- ment technology using CT tunable diode laser absorption spectroscopy”, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 46, 2015, pp. 51-57.
2. Y. Deguchi, “Industrial applications of Laser Diagnostics”, CRS Press: Taylor & Francis, 2011.
 3. D. W. Choi, G. R. Cho, Y. Deguchi, T. S. Baek, and D. H. Doh, “Study on Optimal Coefficients of Line Broadening Function for Performance Enhancements of CT-TDLAS”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 6, 2016, pp. 773-782.
 4. P. Sun, Z. Zhang, Z. Li, Q. Guo, and F. Dong, “Study of two dimensional tomography reconstruction of temperature and gas concentration in combustion field using TDLAS” *Applied Sciences*, Vol. 7, 2017, p. 990.
 5. D. F. Swinehart, “Beer-Lamber Law”, *Journal of Chemical Education*, Vol. 39, 1962, p. 333.
 6. L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe, D. Chris Benner, P. F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L. R. Brown, A. Campargue, J. P. Champion, K. Chance, L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, S. Fally, J. M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W. J. Lafferty, J. Y. Mandin, S. T. Massie, S. N. Mikhailenko, C. E. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O. V. Naumenko, A. V. Nikitin, J. Orphal, V. I. Perevalov, A. Perrin, A. Predoi-Cross, C. P. Rinsland, M. Rotger, M. Šimečková, M. A. H. Smith, K. Sung, S. A. Tashkun, J. Tennyson, R. A. Toth, A. C. Vandaele, J. Vander Auwera, “The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database”, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol. 110, No. 9-10, 2009, pp. 533-572.
 7. X. Zhou, X. Liu, J. 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.* Vol. 14, 2003, pp. 1459-1468.
 8. M. G. Jeon, Y. Deguchi, T. Kamimoto, D. H. Doh, and G. R. 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.
 9. D. W. Choi, M. G. Jeon, G. R. Cho, T. Kamimoto, Y. Deguchi, and D. H. Doh, “Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS)”, *Journal of Thermal Science*, Vol. 25, 2016, pp. 84-89.