

컴퓨터토모그래피 레이저흡수분광법(CT-TDLAS) 기반 2차원 온도분포 산정 Two-Ratios-of-Three-Peaks (2R3P) 알고리즘 개발

최두원^{1,3} · 조경래^{2†} · 심준환¹ · Yoshihiro Deguchi³ · 김동혁² · 도덕희^{2†}

¹한국해양대학교 전자통신공학과, ²한국해양대학교 공과대학 기계공학부,

³Tokushima University, Graduate School of Advanced Tech. & Science

2D Temperature Measurement of CT-TDLAS by Using Two-Ratios-of-Three-Peaks Algorithm

DOOWON CHOI^{1,3}, GYONGRAE CHO^{2†}, JOONHWAN SHIM¹,
YOSHIHIRO DEGUCHI³, DONGHYUK KIM², DEOGHEE DOH^{2†}

¹Dept. of Electronics and Communication Eng., Korea Maritime & Ocean Univ.,
1 Dongsam-dong, Youngdo-gu, Busan 606-791, Korea

²Division of Mechanical Eng., Korea Maritime & Ocean Univ., 1 Dongsam-dong,
Youngdo-gu, Busan 606-791, Korea

³Graduate School of Advanced Tech., & Science, Tokushima Univ., Tokushima 770-8560, Japan

Abstract >> In order to improve the performance of temperature field measurements by CT-TDLAS (Computer Tomography Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), a new reconstruction algorithm, named two-ratios-of-three-peaks method is proposed in this paper. Further, two methods for selecting appropriate initial values of the iterative calculation of CT-TDLAS are proposed. One is MLOS (multiplicative line of sight) method and the other one is ALOS (additive line of sight) method. Two-ratios-of-three-peaks (2R3P) algorithm combined with MART (multiplicative algebraic reconstruction technique) is finally developed for the enhancements of reconstructive calculations. The results have been compared with those obtained by the conventional one-ratio-of-two-peaks (1R2P) algorithm. In order to evaluate the performance of this algorithm, numerical test has been performed using phantom Gaussian temperature distributions with 11×11 square mesh. The performance of the constructed algorithm has been demonstrated by comparing the results obtained in actual burner experiments with those obtained by thermocouples. It has been verified that 2R3P algorithm with MART and MLOS showed best performance than that of 1R2P algorithm.

Key words : CT(컴퓨터토모그래피), TDLAS(레이저흡수분광법), Cross-Correlation(상호상관), MART(승산대수 재구성법), MLOS(선상 승산법), Phantom Temperature(가상 온도)

Nomenclature

[†] Corresponding author : doh@kmou.ac.kr, vpascal@paran.com

Received : 2016.6.1 in revised form : 2016.6.13 Accepted : 2016.6.30

Copyright © 2016 KHNES

A : absorbance

G_j : line broadening function of laser line j

I : intensity of laser light

- L : path length [mm]
- Q : partition function
- n_i : number density of species I
- α : absorption coefficient
- β : relaxation coefficient

Subscripts

- i : species
- j : laser beam number
- ν_i : representative peak wave of species I
- λ : wave length [nm]

1. 서 론

세계 38개국 선진국에서는 2008년부터 기후변화 협약 및 교토의정서에 따라 자국 내의 할당된 이산화탄소 배출량 감축정책을 시행하고 있다. 영국 가디언지에서는 전 세계 상선의 연간 이산화탄소 배출량은 12억 2000만 톤으로 전 세계 주요 온실가스 배출량의 4.5%가 된다고 보고하고 있으나, 실제로는 배출되는 양은 세 배 정도 더 많은 것으로 보고 있다. 이러한 차이는 기존 온실가스의 부정확한 농도추정 방법에 의한 것으로 선박배출 가스의 정밀한 측정의 필요성과 배기가스를 줄이기 위해 엔진 성능향상을 위한 온도장 해석의 필요성을 시사하고 있다. 그리하여, 2차원 온도장, 농도장을 측정할 수 있는 CT-TDLAS (computed tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy) 기법의 개발연구가 진행되고 있다¹⁻⁴⁾.

Choi 등^{5,6)}은 CT-TDLAS법에서의 온도장 농도장 성능향상을 위하여 특정파장에서만의 레이저빔 흡수 강도의 최대값 대신에 모든 파장에서의 흡수강도 신호들의 패턴(pattern)을 매칭(matching)시켜 온도분포를 재구성할 수 있는 새로운 계산알고리즘 개발을 한 바 있다. 그러나 이 알고리즘은 2개의 특징적 최댓값만을 사용하는 관계로 일부 온도영역에서 측정

오차가 상대적으로 큼이 확인되었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하기 위하여, 3개의 특징적 최댓값들의 비를 활용하여 온도장 측정 성능향상이 가능한 Two-Ratios-of-Three-Peaks 알고리즘 개발에 관한 내용을 담고 있다. CT-TDLAS를 위한 데이터의 재구성 계산방법으로서 MART (multiplicative algebraic reconstruction technique)법⁵⁾을 적용하였다. 새롭게 개발된 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 가상의 온도장을 구현하였으며, 이를 이용하여 수치적 성능평가를 수행하였으며, 10개의 레이저 빔에 의하여 얻어진 실제 버너실험의 결과를 적용함으로써 새롭게 제안된 Two-Ratios-of-Three-Peaks (2R3P) 알고리즘의 성능을 평가하였다.

2. TDLAS와 2R3P 이론

흡수분광학의 기본 원리는 Beer-Lambert 법칙으로 설명할 수 있다. 빛이 흡수 매체를 통과할 때 흡수, 투과된 빛의 세기는 단위 부피 안의 기체의 입자수인 농도와 관련이 있으며, 흡수량 레이저의 초기신호와 투과된 신호의 강도비로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_\lambda}{I_{\lambda_0}} = \exp\{-A_\lambda\} = \exp\left\{-\sum_i \left(n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{\nu_i,j}\right)\right\} \quad (1)$$

여기서, I_λ 은 투과되어진 빛의 강도를, I_{λ_0} 은 입사광의 초기강도를 나타내고, 하첨자 i, j, λ 는 각각 기체의 종, 레이저, 파장을 나타내며, $S_{i,j}$ 는 온도함수인 선강도(line-strength), $G_{\nu_i,j}$ 는 선폭함수(broadening function)이다. 선폭확장은 분자가 빛을 흡수할 때 온도와 압력의 영향으로 발생하는 선형함수 형태를 갖는다. n_i 는 i 종 기체의 수밀도(number density), L 은 흡수길이를 나타낸다. 온도함수인 선강도는 식 (2)에 의해 계산된다.

Table 1 Information of selected spectra lines of H₂O at reference temperature (296K)

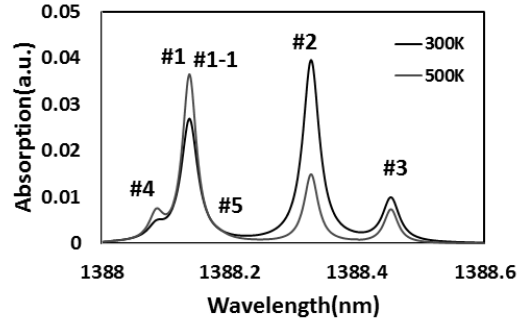
| Frequency v ₀ [cm ⁻¹] | Wavelength λ[nm] | Line- Strength [cm ⁻¹ ·atm ⁻¹] | E'' [cm ⁻¹] |
|----------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| 7202.255 | 1388.453 | 2.73×10 ⁻² | 446.51 |
| 7202.909 | 1388.326 | 1.15×10 ⁻¹ | 70.09 |
| 7203.658 | 1388.183 | 1.59×10 ⁻⁴ | 1742.30 |
| 7203.903 | 1388.136 | 1.88×10 ⁻² | 742.08 |
| 7203.906 | 1388.135 | 5.65×10 ⁻² | 742.07 |
| 7204.166 | 1388.085 | 7.88×10 ⁻³ | 931.24 |

$$S_v(T) = S_v(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT_0}\right)\right]^{-1} \quad (2)$$

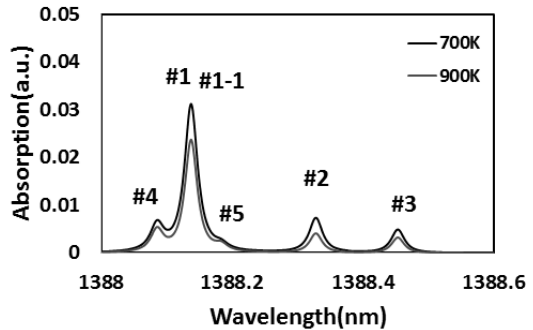
여기서, T₀는 표준온도(296K), E''(lower state energy)는 저준위 에너지, h [J·s]는 플랑크상수, k [J/K]는 볼츠만 상수, c [cm/s]는 빛의 속도, Q(T)는 분배함수(partition function)로서 분자의 에너지상태량에 관계하는 4차식의 온도함수로 나타낸다⁶⁾. 본 연구에서는 수많은 선강도 값들 중에서 무시해도 될 정도의 작은 선강도를 가지는 파장들은 제외시키고, 높은 선강도를 가지는 6개의 대표파장을 선정하였고, Table 1은 HITRAN2008database⁷⁾에서 제공하는 선정된 파장에서의 H₂O분자의 선강도와 저준위에너지 값을 나타낸다.

Fig. 1(a), (b)는 선정된 파장을 이용해 만들어진 흡수스펙트럼 곡선이다. #1~#5는 대표파장을 나타내고 있으며, 대표파장에서 흡수선의 강도가 높음을 알 수 있다. 그 중에서도 흡수강도가 높은 #1 (#1+#1-1), #2, #3 세 파장의 온도에 따른 선강도 곡선을 Fig. 2에서 보여주고 있다.

Fig. 3은 Fig. 2로부터 만들어진 흡수강도의 비(ratio)이다. 온도에 따라 흡수비가 뚜렷하게 나타나는 #1/#2, #1/#3는 재구성 알고리즘 계산에서 흡수량을 온도로 환산하는 중요한 정보를 제공한다. Fig 4



(a) 300 K, 500 K 0.1 Mpa



(b) 700 K, 900 K 0.1 Mpa

Fig. 1 Graphs of theoretical H₂O absorption spectra

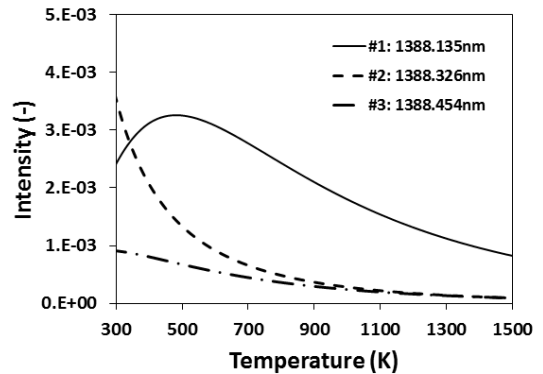


Fig. 2 Temperature dependence of three lines

는 본 연구에서 구성된 격자와 레이저 빔들을 2차원으로 배열시킨 개략도이다. 2차원 배열의 레이저 빔들은 가스의 단면 전체(흡수매체)에 걸쳐서 배치되는데, 이들 배열의 교차점이 해석단위 셀(cell)이 된다. 셀 영역을 지나가는 레이저 빔의 흡수량은 식 (3)으로 구하였다.

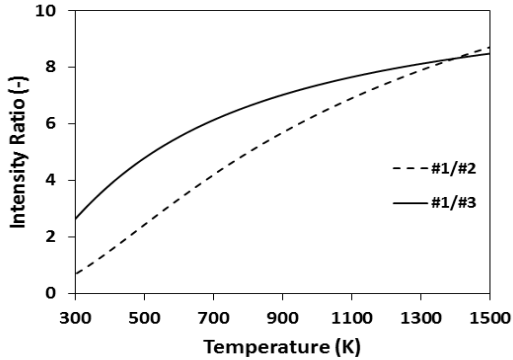


Fig. 3 Intensity ratios from three absorption lines

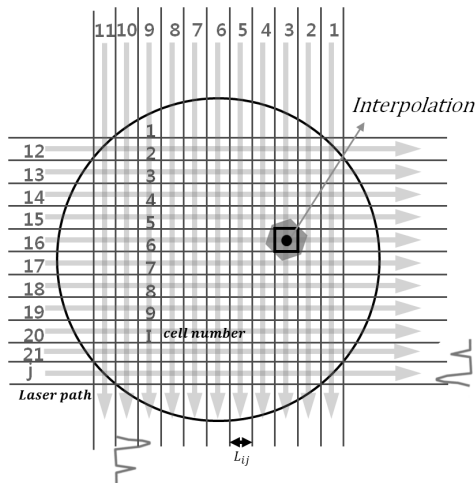


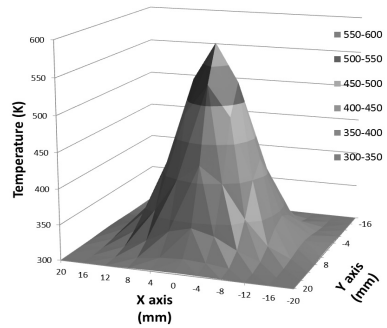
Fig. 4 Analysis grid and laser beam path

$$A_j = \sum_i n_{i,j} L_{i,j} \alpha_{i,j} \quad (3)$$

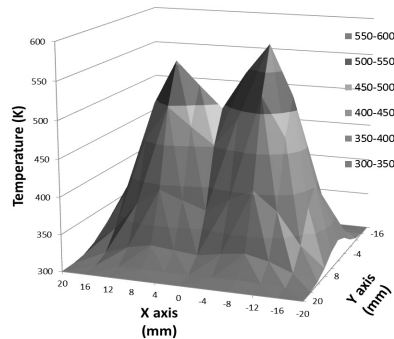
여기서, A_j 는 j 레이저 빔의 흡수량을 나타내고, $\alpha_{i,j}$ 는 j 레이저가 지나가는 i 셀에서의 선강도와 선폭확장으로 나타내는 흡수계수(absorption coefficient)이다.

3. 가상 온도장 적용 해석

CT-TDLAS 해석에서 온도 산정 알고리즘은 일반적으로 두 파장의 최대 흡수량 값의 비를 이용해 온도를 찾는 방식이 사용되고 있다. 본 연구에서는 가상레이저의 데이터를 이용하여 기존의 두 파장을 이



(a) Temperature distribution used by Gaussian function



(b) Temperature distribution used by superimposed two Gaussian functions

Fig. 5 Phantoms data of 2D temperature distributions

용하는 방식(one-ratio-of-two-peaks, 1R2P)에서 변환되는 온도의 정보를 더 많이 줄 수 있는 세 파장을 이용하는 방식인 two-ratios-of-three-peaks (2R3P) 방식을 사용하였다. 기존의 두 파장 이용 방식은 #1, #2 파장에서 #1/#2의 흡수량의 비를 구하여, Fig. 2를 통해 온도를 산정하는 방식이고, two-ratios-of-three-peaks 방식은 #1, #2, #3 파장에서 #1/#2 와 #1/#3의 흡수량의 비를 구하여 Fig. 2를 통해 각각 온도를 구하여 평균온도를 찾는 방식이다. 이 방식을 이용하면 반복 계산을 통해 온도로 변환될 때, 큰 오차로 인해 발생하는 오류를 줄여주어 안정적인 계산을 가능하게 한다.

Fig. 5는 이론적인 모델 분석을 위하여 실제 연소 온도장과 유사한 가우시안 분포의 가상 온도장이다. 온도장 영역은 121개의 정사각형 셀로 구성되어 있

으며, 셀의 길이는 4 mm이다. 일정한 간격으로 배치된 가로 11개, 세로 11개의 가상레이저는 각 셀의 중심부를 통과하며, 식 (1)과 선평확장으로 Voigt profile의 Whiting법⁸⁾을 적용하여 1388.0~1388.6 nm 영역에서의 H₂O 흡수량 그래프를 만들었다. 본 연구에서는 토모그래피 재구성 방법으로 편차를 곱셈 수정벡터로 하며, 수렴속도가 빠른 MART법을 사용하였다. 가상흡수량과 계산된 흡수량의 편차가 0에 가까워지도록 수렴할 때까지 반복 계산하는 방법으로 식 (4)는 MART법의 알고리즘을 나타낸다.

$$\alpha_{\lambda,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{\lambda,i}(i)^{(k)} \times \left[\frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, I)$$

여기서, 하첨자 λ , i , j 는 파장, 셀 번호, 레이저 path번호이다. k 는 반복계산 횟수를 나타내고, β (relaxation parameter)는 수렴속도에 영향을 주는 가중치이다. β 값은 0~1 사이의 값을 가지는데 본 연구에서는 최적화된 0.1을 사용하였다.

3.2 초기값 산정

적절한 초기 온도 값의 산정은 토모그래피 계산결과에 영향을 미치는 요소 중 하나로서, 부적절한 초기값은 발산하는 방향으로 계산을 이끌게 된다. 미지의 온도장에서 초기 온도값을 정하는 것은 쉽지 않은 일이다. 임의로 초기 온도값을 산정하여 수렴하는 방향으로 계산을 이끄는 것도 쉽지 않으며, 많은 계산시간이 소요될 것이다. 본 연구에서는 ALOS (additive line of sight)와 MLOS (multiplicative line of sight) 법⁹⁾을 이용하여 초기값을 산정하였다. 이는 각 셀을 교차하는 레이저들의 파장 #1, #2의 통합된 흡수량의 비를 계산하여, Fig. 3의 강도의 비를 이용하여

초기온도를 산정하는 방법으로 아래의 식과 같이 나타낸다.

$$R_{ALOS} = \frac{A_{\#1,p} + A_{\#1,q}}{A_{\#2,p} + A_{\#2,q}} \quad (5)$$

$$R_{MLOS} = \frac{A_{\#1,p} \times A_{\#1,q}}{A_{\#2,p} \times A_{\#2,q}}$$

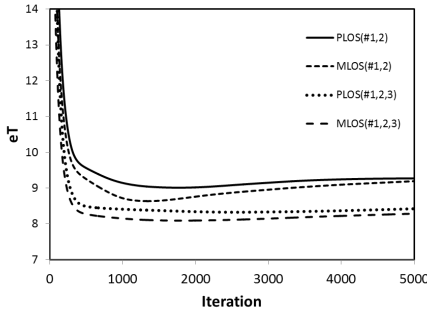
여기서, 하첨자 p , q 는 가로, 세로 레이저 빔이고, R_{ALOS} 는 각 셀에서 그 셀을 교차하는 빔들의 파장 #1, #2의 흡수량의 합의 통합 비로 나타낸 값이고, R_{MLOS} 는 파장 #1, #2의 흡수량의 곱의 통합 비로 나타낸 값을 나타낸다. 121개의 모든 셀마다 통합된 흡수량의 비를 구한 후, 온도로 변환하면 모든 셀들의 초기치 온도를 산정할 수 있게 된다. 본 논문에서는 가로, 세로 두 개의 레이저 정보로 초기온도를 산정하였지만, 교차하는 레이저 정보가 더 많다면 더욱 정확한 초기온도를 산정할 수 있을 것이다.

3.2 성능 평가

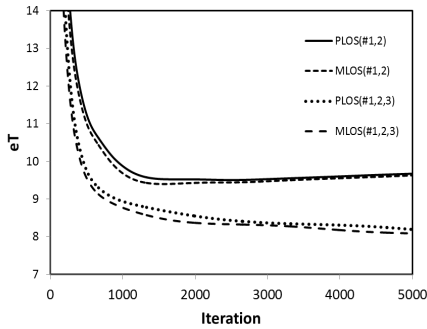
재구성된 온도의 최종 수렴여부는 목표치흡수량과 계산된 흡수량의 차가 최소가 되도록 식 (6)과 같이 MSE (Mean Squared Errors) 방식을 사용하였다.

$$Error = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \{(A_{\lambda,i,j})_{\text{cal}} - (A_{\lambda,i,j})_{\text{pha}}\}^2 \quad (6)$$

여기서, $(A_{\lambda,i,j})_{\text{cal}}$ 는 계산된 흡수량을, $(A_{\lambda,i,j})_{\text{pha}}$ 는 가상 레이저의 흡수량을 나타낸다. 수렴조건은 10E-10보다 작을 때까지 반복 계산을 한다. 수렴조건에서 재구성된 온도의 정확도를 평가하기 위하여 평균온도편차(Average temperature deviation)를 아래의 식 (7)로 계산하였다.



(a) ALOS and MLOS methods at one Gaussian function



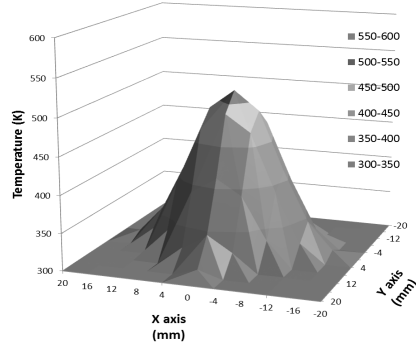
(b) ALOS and MLOS methods at superimposed two Gaussian functions

Fig. 6 Average deviation between phantom and calculated data

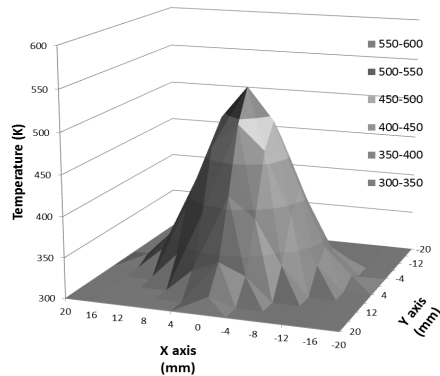
$$eT = \frac{\sum_{i=1}^I |T_{cal,i} - T_{pha,i}|}{I} \quad (7)$$

여기서, eT 값은 계산된 온도 $T_{cal,i}$ 와 가상설정온도 $T_{pha,i}$ 와의 평균 온도편차를 나타낸다.

Fig. 6는 서로 다른 4가지의 조건에서 계산된 eT 값의 결과를 보여준다. 두 파장 이용 방식과 two-ratios-of-three-peaks 방식을 각각 ALOS법과 MOLS 법으로 초기온도를 주었을 때, 재구성 온도의 결과를 비교한 것이다. Fig. 6(a)는 가우시안분포(one Gaussian function)를 사용한 가상온도장에서 계산된 결과값이고, Fig. 6(b) 혼합형의 가우시안 분포(superimposed two Gaussian function)를 사용한 가상온도장에서 계산된 결과값이다. 두 가상 온도장에 적용해 본 결과, MLOS법과 two-ratios-of-three-peaks (2R3P) 알고리



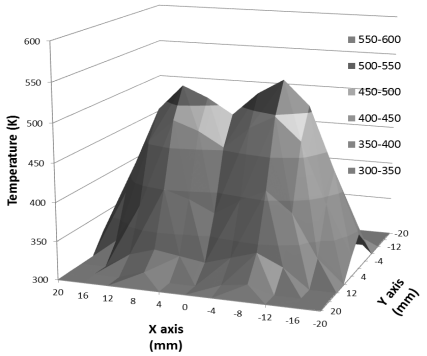
(a) one-ratio-of-two-peaks



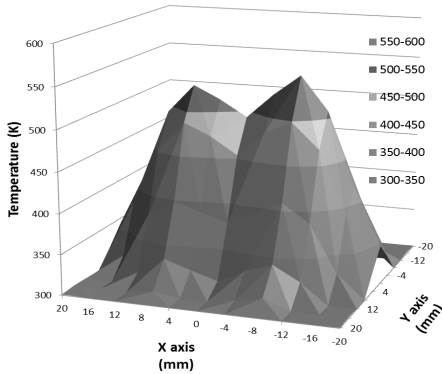
(b) two-ratios-of-three-peaks

Fig. 7 Reconstructed 2D temperature distribution calculated for one Gaussian function

즘으로 온도를 갱신했을 때 평균온도편차가 최소로 나왔다. 초기값 산정은 ALOS법보다 MLOS법이 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있고, two-ratios-of-three-peaks 방식이 기존의 두 파장 이용 방식보다 더 나은 성능의 재건방법임을 알 수 있었다. Fig. 7과 Fig. 8은 하나의 가우시안 분포와 혼합형의 가우시안 분포로 만들어진 가상 온도장에서 두 파장 이용 방식과 two-ratios-of-three-peaks 알고리즘으로 평균온도 편차가 최소가 될 때, 재구성된 온도분포의 결과이다. 모든 계산에서 초기 온도는 MLOS법을 사용하였고, 재구성 계산은 MART법을 사용하였으며, 경계조건 (Boundary condition)의 온도는 300K으로 설정하였다. 가상온도장과 재구성된 온도장의 error값들의 범위는 Fig. 7(a)에서 -2.7K~64.9K, Fig. 7(b)에서 -0.9K~



(a) one-ratio-of-two-peaks



(b) two-ratios-of-three-peaks

Fig. 8 Reconstructed 2D temperature distribution calculated for superimposed two Gaussian functions

45.7K, Fig. 8(a)에서 -24K~45.9K. Fig. 8(b)에서 -18K~35.5K로 나타났다. 가상데이터로부터 이론적인 계산에 의해 재구성 온도분포를 구해 본 결과, MART법과 MLOS법과 two-ratios-of-three-peaks 알고리즘을 조합했을 때가 가장 좋은 재구성 온도산정 결과를 나타내었다.

4. 실험데이터와의 비교

4.1 실험 장치

Fig. 9는 10개의 레이저 빔을 이용한 버너실험 장치도를 나타낸다. H₂O의 1388 nm 흡수스펙트럼을 측정하기 위해서, 주사범위 0.6 nm의 DFB 반도체 레이저 (NTT Electronics Co., NLKE5GAAA)를 사용

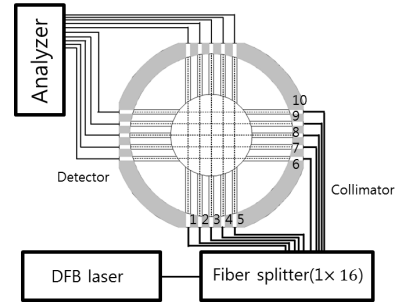


Fig. 9 Schematic experimental setup with 10 beams

하였고, 레이저의 스캔 주파수는 1 kHz로 설정하였다.

레이저 신호는 포토다이오드(Hamamatsu Photonics, G8370-01)에서 검출되어지고, 검출된 신호는 데이터 레코더(8861 Memory Highcoda HD Analog16, HIOKI)에 저장된다.

셀의 측정영역은 40 mm이며, 메탄연료를 이용하여 분젠(Bunsen) 타입의 버너를 사용하였다. 연소 불꽃은 측정영역 셀의 중앙에 위치시켰다. 안정적인 완전연소를 위해 메탄가스와 공기의 유속을 각각 30 L/min, 102 L/min로 일정하게 유지시켰으며, 계산에 의해 재구성된 온도와의 검증에 위해 직경 100 μm의 열전대(thermocouple)를 이용해서 574(24×24)개 점에 걸쳐서 온도측정 실험을 하였다.

4.2 실험 결과

모든 레이저신호를 흡수 스펙트럼으로 변형시킬 때, Polynomial noise reduction technique¹⁰⁾을 사용하여 레이저 빔 스티어링(beam steering)에 의한 노이즈를 제거하였다. 10 path레이저는 동시측정 되었으며, Fig. 10에서는 1388 nm 영역의 H₂O 흡수스펙트럼 결과를 보여주고 있다. 저온영역은 레이저 path 1, 5, 6, 10이 지나가고, 중간온도영역은 레이저 path 2, 4, 7, 9가 지나가며, 고온영역은 레이저 path 3, 8이 지나간다. 스펙트럼의 최대 피크(peak)값은 각 온도영역별로 유사한 스펙트럼 형상을 가지고 있음을 알 수 있다.

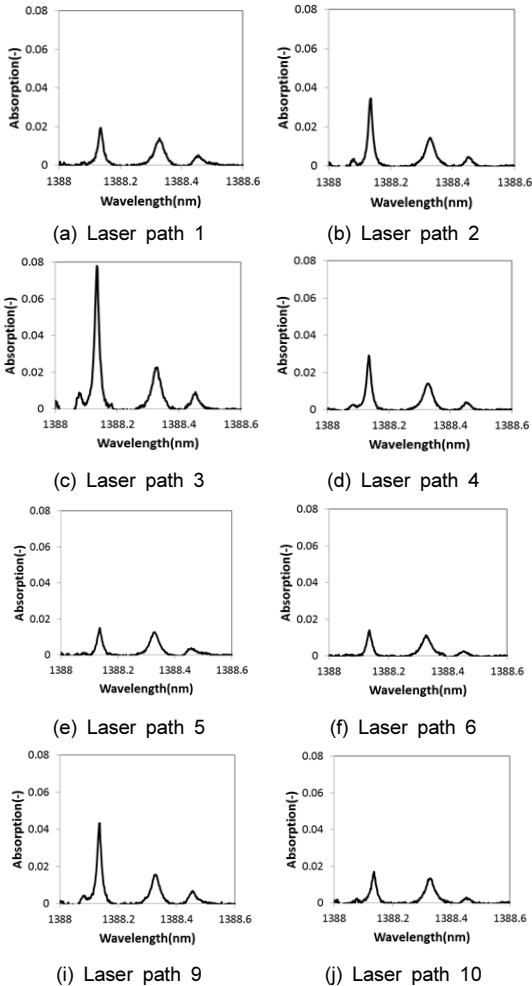


Fig. 10 Absorption graphs of H₂O spectrum with 10path lasers

Fig. 11은 서모커플에 의한 버너실험의 온도분포를 측정된 결과이다. 버너불꽃은 측정영역의 한 가운데(X=0, Y=0)에 위치하였고, 서모커플을 2 mm간격으로 이동하면서 측정영역의 전 구간에 걸쳐서 온도를 측정하였다. 최고온도는 1115 K이며, 경계영역의 온도는 약 300 K을 유지하였다.

4.3 재구성 계산 결과

10 path의 레이저 빔을 사용하여 11×11영역을 해석하기에는 공간분해능이 떨어질 수 밖에 없다. 따라

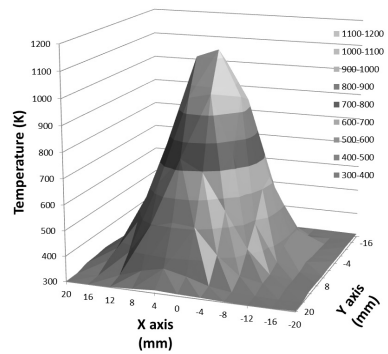


Fig. 11 2D temperature distribution measured by thermocouple

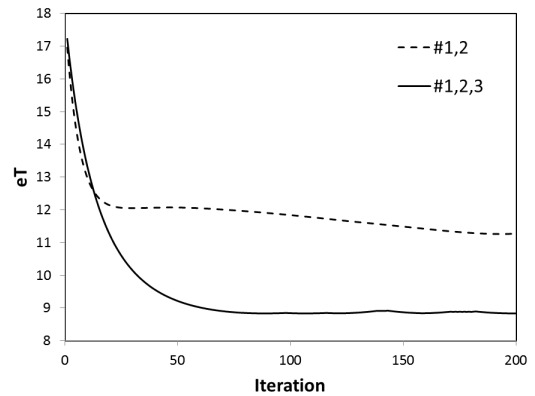
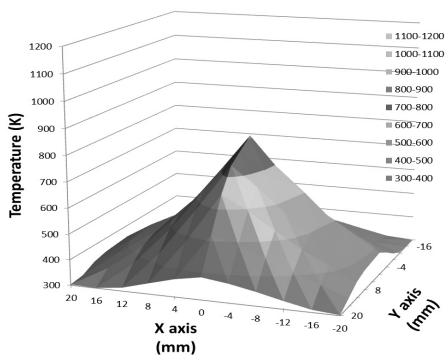


Fig. 12 Comparison of the average temperature deviation between one ratio of two-peaks(#1,2) and two ratios of three-peaks(#1,2,3) methods

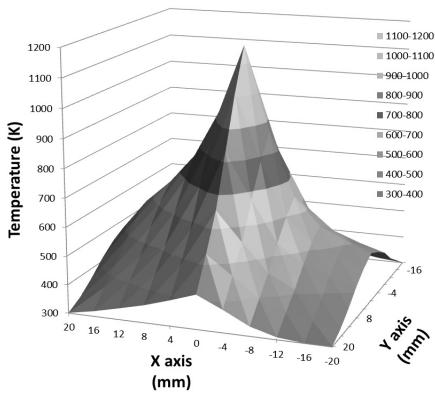
서 레이저실험으로부터 얻는 10 path의 데이터로부터 거리역수 보간법[9]을 이용하여 12개의 가상레이저를 추가하였다. 재구성 계산의 초기온도는 MLOS법을, 재건계산은 MART법을 사용하였다. 신호값의 커브피팅은 가상 온도장에서와 동일하게 두 파장 이용 방식과 two-ratios-of-three-peaks 방식으로 수렴할 때까지 반복 계산을 하여 결과를 비교하였다.

Fig. 12는 실험데이터를 이용한 두 파장 이용 방식과 two-ratios-of-three-peaks 방식의 평균온도편차의 결과이다. 가상온도장에서와 마찬가지로, 실험데이터에 적용시켰을 때에도 two-ratios-of-three-peaks 방식이 두 파장 이용 방식보다 더 좋은 결과를 보였다.

Fig. 13은 실험데이터를 이용하여 수렴되었을 때



(a) 2D temperature distribution by using one-ratio-of-two-peaks from experiment data



(b) 2D temperature distribution by using two-ratios-of-three-peaks from experiment data

Fig. 13 Reconstructed 2D temperature distribution calculated by using MART and MLOS method from experiment data

의 재구성 온도분포 결과이다. Fig. 13(a)는 두 파장 이용 방식으로 계산된 결과이며, Fig. 11의 서모커플로 측정된 2차원 온도장과 비교했을 때, 중심부($X=0$, $Y=0$)인 고온영역에서 오차가 크게 발생하였다. 반면에 Fig. 13(b)에서는 전체적인 기울기가 급한 형태이나 고온부가 잘 맞았으며, 적은 오차를 보였다. 급한 기울기는 적절한 가우시안 필터(Gaussian filter)를 통해 보완 가능하나, 가우시안 필터는 온도가 떨어지게 만들므로 오차를 증가시키는 단점이 있다. 향후 적절한 가우시안 필터를 적용시키는 방법에 관한 연구가 필요할 것으로 보인다. 서모커플 측정 온도와 재구성

된 온도와의 오차 범위는 Fig. 13(a)의 두 파장 이용 방식에서는 $-191\sim 417\text{K}$ 이고, Fig. 13(b)의 two-ratios-of-three-peaks 방식에서는 $-185\sim 161\text{K}$ 로 one-ratio-of-two-peaks 방식보다 실험적으로도 더 좋은 결과가 보임을 알 수 있었다.

5. 맺음말

본 연구에서는 CT-DTLAS 기반 레이저 흡수신호 값의 커브 피팅 방법과 초기온도 설정법과 온도분포 산정결과에 관해 논하였다.

- 1) 두 파장 이용 방법보다 two-ratio-of-three-peaks 알고리즘이 이론적으로 실험적으로도 더 좋은 재계산 성능을 보임이 증명이 되었다.
- 2) ALOS와 MLOS방법으로 초기치 설정이 가능하였으며 성능평가 계산 결과, MLOS (Multiple line of sight) 방법이 조금 더 좋은 결과가 나왔다.
- 3) MART법과 MLOS (multiplicative line of sight) 방법과 two-ratios-of three-peaks 알고리즘을 조합하여 2차원 온도장의 해석을 했을 때, 가장 좋은 온도분포 산정 결과를 나타냈다.

흡수량의 최대값의 비의 정보를 더 많이 이용하면, 더 좋은 재구성 계산 성능을 발휘함을 알 수 있었다. 향후 이론적으로 실험적으로 증명된 two-ratios-of-three-peaks 방식은 적절한 가우시안 필터를 통해 보완이 되면, 실제 2차원 온도장 해석에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견핵심과제(No.2015R1A2A2A01006803)와 지역혁신창의인력양성사업(No.2015H1C1A1035890)의 일환으로 수행되었음.

References

1. T. Kamimoto, Y. Deguchi, D. W. Choi, J. H. Shim, "Validation of the Real-Time 2D Temperature Measurement Method using the CT Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy", *Heat Transfer Research*, Vol. 47, 2016, pp. 193-202.
2. L. Ma and W. Cai, "Numerical Investigation of Hyperspectral Tomography for Simultaneous Temperature and Concentration Imaging", *Applied Optics*, Vol. 47, No. 21, 2008, pp. 3751-3759.
3. M. Yamakage, K. Muta, Y. Deguchi, S. Fukada, T. Iwase and T. Yoshida, "Development of Direct and Fast Response Exhaust Gas Measurement", SAE Paper No. 20081298, 2009.
4. F. Wang, K. F. Cen, N. Li, J. B. Jeffries, Q. X. Huang, J. H. Yan and Y. Chi, "Two-Dimensional Tomography for Gas Concentration and Temperature Distributions based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 4, Paper No. 045301, 2010.
5. D. W. Choi, M. G. Jeon, G. R. Cho, T. Kamimoto, Y. Deguchi and D. H. Doh, "Performance Improvement in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS)", *Journal of Thermal Science*, Vol. 25, No. 1, 2016, pp. 84-89.
6. D. W. Choi, M. G. Jeon, G. R. Cho, T. Kamimoto, Y. Deguchi and D. H. Doh, "Developments of a Cross-Correlation Calculation Algorithm for Gas Temperature Distributions Based on TDLAS", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 1, 2016, pp. 127-134.
7. R. R. Gamache, S. Kennedy, R. Hawkins and L. S. Rothman, "Total Internal Partition Sums for Molecules in the Terrestrial Atmosphere", *Journal of Molecular Structure* 517-518, 2000, pp. 407-425.
8. 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. Simeckova, M. A. H. Smith, K. Sung, S. A. Tashkun, J. Tennyson, R. A. Toth, A. C. Vandaele, and J. Vander Auwera, "The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 110, 2009, pp. 533-5729.
9. D. H. Doh, C. J. Lee, G. R. Cho and K. R. Moon, "Performances of Volume-PTV and Tomo-PIV", *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 2 No. 4A, 2012, pp. 368-374.
10. J. Song, Y. Hong, G. Wang and H Pan, "Algebraic Tomography Reconstruction of Two-Dimensional Gas Temperature Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy", *Applied Physics B: Laser and Optics*, Vol. 112, 2013, pp. 529-537.