

레이저흡수분광 토모그래피법에서의 레이저빔의 최적 배치에 관한 연구

김경원¹ · 윤동익¹ · 최두원² · 조경래³ · 도덕희^{3,†}

¹한국해양대학교 냉동공조공학과, ²한국해양대학교 전자통신공학과, ³한국해양대학교 공과대학 기계공학부

Study on Optimal Arrangements of Laser Beams in Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Based Tomography (TDLAST)

KYUNGWON KIM¹, DONGIK YOON¹, DOOWON CHOI², GYEONGRAE CHO³, DEOGHEE DOH^{3,†}

¹Division of Refrigeration and Air-conditioning Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

²Division of Electronics and Communication Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

³Division of Mechanical Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

† Corresponding author :
doh@kmou.ac.kr

Received 29 September, 2017
Revised 6 November, 2017
Accepted 29 December, 2017

Abstract >> The measurement accuracy of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy based Tomography (TDLAST) for the temperature and concentration fields are dependant upon the arrangement method of the used laser beams. This paper reports on the optimization of laser beam arrangements using phantom data. It has been verified that the measurement error of the TDLAST decreased with increase of laser beam numbers. Further, it has been confirmed that perpendicular arrangements between the horizontal and the vertical laser beams without additional diagonal laser beams shows the minimum measurement errors.

Key words : TDLAST(레이저흡수분광 토모그래피법), Arrangement(배열), Optimization(최적화), Temperature distribution(온도분포), Concentration distribution(농도분포)

1. 서 론

국제해사기구(IMO)는 선박으로부터 배출되는 SOx 오염물질을 규제하기 위해 현재 3.5%의 SOx 함유량을 2020년부터 전 세계 해역에서 0.5% 미만으로 줄인다는 규정을 발표하였다. 이에 따라 전 세계적으로 배기가스에 의한 환경오염문제가

큰 화제로 대두되고 있으며, 이에 따라 배기가스 측정방법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

한편, 현재까지의 배기가스 측정기술은 1점 측정방식으로 전체 배기가스의 농도와 배출량을 알아내는 것은 측정원리상 불가능하다. 다시 말하면 배기관이 큰 경우 가스농도가 불균일하게 방출될 때 측정되는 값은 신뢰성이 매우 떨어진다고 볼 수 있다. 이와 대

조적으로 computed tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy (CT-TDLAS)는 가변파장대의 레이저를 이용하여 가스의 온도와 농도에 따라 흡수선의 세기(Intensity)가 달라지는 특성을 이용하여 배기가스의 농도와 배출량을 측정하는 기술로서 다수의 레이저 빔을 이용하여 2차원 평면의 온도분포와 농도분포 산정이 가능하다¹⁻⁵⁾.

지금까지의 연구에서는 2차원 평면상에 가로 및 세로에 각각 n개가 배열된 형태의 수직교차형 레이저 빔 배열을 이용한 사례³⁻⁵⁾와 측정오차를 줄이기 위한 일환으로 수직교차형 레이저 빔 배열에 45도 각도의 대각선 방향으로 레이저 빔 배열을 추가적으로 배치한 사례⁶⁾가 있어 왔으나, 레이저 빔 배치에 따른 측정오차 성능에 대한 연구는 없었다.

본 연구에서는 CT-TDLAS법에서의 레이저 빔 배열에 따른 CT-TDLAS법에 의한 가스의 2차원 온도장, 농도장에 대한 측정오차 성능을 비교 평가함으로써 레이저 빔 배열의 최적 선정 방안을 제시하는 것을 연구의 목표로 삼고 있다. 측정가스 대상으로는 가스에 포함되어 있는 수증기(H₂O)를 선정하였는데, 수증기가 특정 파장대(1,388.0-1,388.6 nm)에서 흡수스펙트럼 반응이 큰 레이저 빔을 적용하였다.

2. TDLAST

2.1 Lambert-Beer's Law

가변파장의 레이저를 이용한 흡수분광법은 입사광이 가스매질을 통과할 때 매질의 개수밀도와 온도, 빛의 투사길이에 관련이 있으며, 이는 Lambert-Beer's Law¹⁾로 설명될 수 있고 식 (1)로 나타난다.

$$\begin{aligned} \ln \frac{I}{I_0} &= A_\lambda \\ &= - \sum_i n_\lambda \alpha L_\lambda \\ &= - \sum_i \left(n_\lambda L \sum_j S_{i,j}(T) G_{vi,j} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, I 는 투사광, I_0 는 입사광을 의미하며 A_λ 는 λ 파장에서의 빛 흡수량, n_λ 은 개수밀도, α 는 흡수계수(coefficient of absorption), L_λ 는 빛이 매질을 통과하는 투사길이이다. 흡수계수 α 는 선강도함수 $S_{i,j}(T)$ 와 선폭확장에 영향을 주는 선형함수 $G_{vi,j}$ 로 나타낼 수 있다. $G_{vi,j}$ 는 선폭확장함수로 실험을 통해 결정되는 요소이다.

2.2 TDLAST 계산 과정

Fig. 1은 구성된 격자와 레이저 빔들을 2차원 개략도이다. 각각의 레이저 빔들은 서로 수직으로 교차하게 되는데 이 교차점의 해석영역이 각각의 격자(Grid)가 된다. 격자를 지나는 레이저 빔의 흡수량은 식 (1)을 이용하여 계산된다.

가스매질에 대한 특정 파장에서의 선강도(line strength)는 온도함수로서 식 (2)로 나타낼 수 있는데 HITRAN database⁷⁾에서 제공하는 파장에 따른 선강도와 저준위에너지 값을 이용하여 선강도를 계산하였다.

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

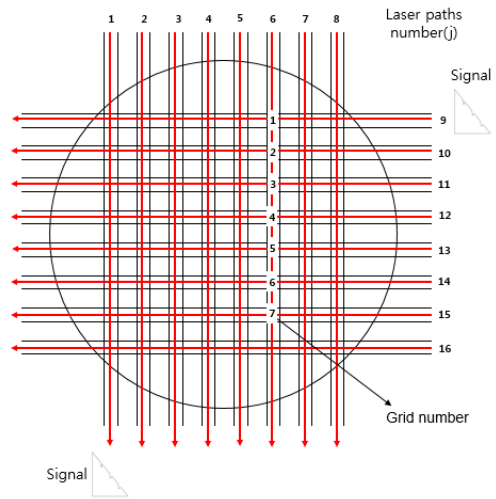


Fig. 1. Analysis grid and laser beam path

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}

여기서 T_0 는 표준온도(296 K), V_0 는 천이 주파수, E' 는 저준위에너지, h [J·s]는 플랑크상수, k [J/K]는 볼츠만상수, c [cm/s]는 빛의 속도 $Q(T)$ 는 분배함수(partition function)로 식 (3)과 같이 4차 다항식으로 나타낸다. 각 계수는 온도에 따라 값이 정해지며 그 값은 Table 1과 같다.

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

2.3 2R3P알고리즘과 6-Peaks 알고리즘 성능 비교

Fig. 2는 HITRAN Database 2008을 이용하여 얻을 수 있는 300 K와 500 K의 온도의 특정 파장대에서의 이론흡수스펙트럼을 나타낸다. #1, #2, #3는 파장대의 대표파장을 뜻하는데, 선강도 값이 가장 클 때의 파장을 뜻한다. 이들은 온도에 따라 흡수강도가 달라지는데 그 특성은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있으며 이 또한 HITRAN Database 2008로부터 얻어질 수 있다. 3개의 Peak 파장의 흡수비를 이용하면 Fig. 4와 같은 그래프를 만들 수 있고 2개의 흡수비의 평균값을 이용하여 온도를 산정하는 방법인 two-ratios-three-peaks (2R3P) 알고리즘을 사용해왔다³⁾. 이 알고리즘은 3개만의 peak파장을 이용하는 관계로 흡수스펙트럼에 대한 정보량이 적어 측정 결과에 오차증대의 요인으로 작용해 왔다. 본 연구에서는 선정된 파장영역에서 최대한 많은 정보를 이용하여 온도를 산정하기 위해 6점 최적화 피팅(fitting) 알고리즘을 이용하였다. 6점 최적화 피팅법(6-lines-profiles fitting)은 6개의 peak 파장을 이용하여 온도를 산정하는 알고리즘(6-peaks)으로 Fig. 5에서 확인할 수

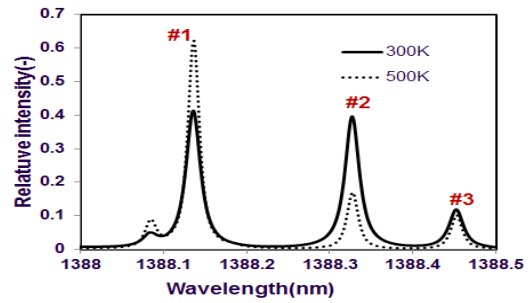


Fig. 2. H₂O Absorption spectrum depend on temperature

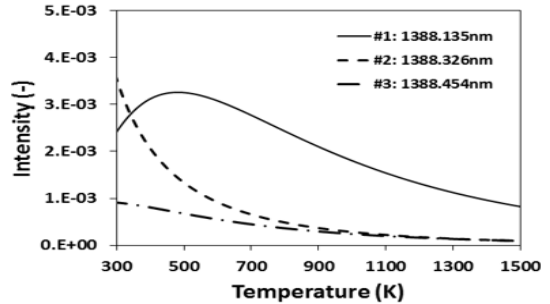


Fig. 3. Temperature dependence of three peak points

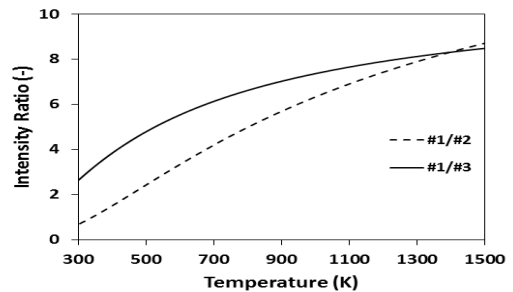


Fig. 4. The absorption ratios of three peak points

있듯이 흡수스펙트럼에서 6개(#1~#6)의 특정파장이 온도에 따라 Fig. 6과 같이 흡수강도가 변하는 것을 이용하여 온도를 산정한다.

두 알고리즘의 성능을 비교 평가를 위해 가상(phantom)온도 분포를 이용하였다. 가상온도 분포는 식 (4)의 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 이용하여 생성하였고 그 결과는 Fig. 7과 같다.

$$T_{i,j} = B \exp[-(i^2 + j^2)/\sigma^2] + T_0 \quad (4)$$

B는 최대 온도값, T_0 는 최저 온도값이고 σ 는 2로

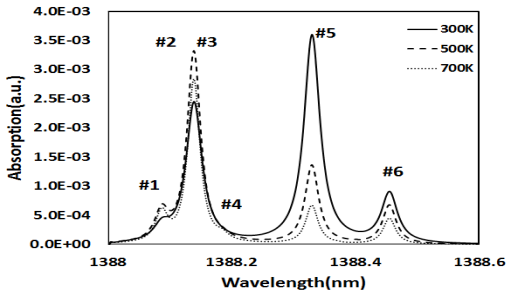


Fig. 5. Six peaks on H₂O absorption spectrum

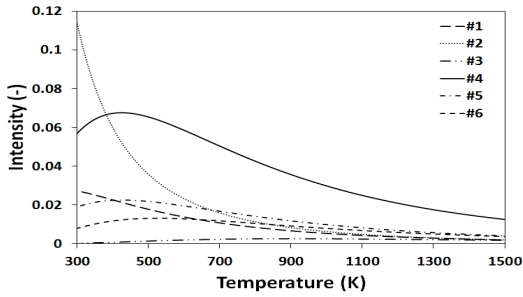
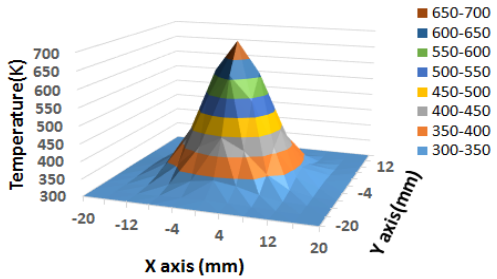
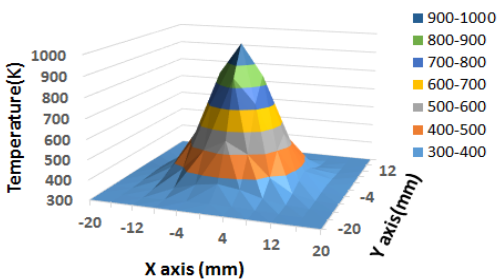


Fig. 6. Temperature dependence of six peak points



(a) Virtual temperature distribution at low temperature



(b) Virtual temperature distribution at high temperature

Fig. 7. Generated virtual temperature distribution. (a) Virtual temperature distribution at low temperature, (b) Virtual temperature distribution at high temperature

설정하였다. 가상온도 분포는 11×11의 레이저 빔이 통과하는 원형 배기구로, 배출되는 가스 온도

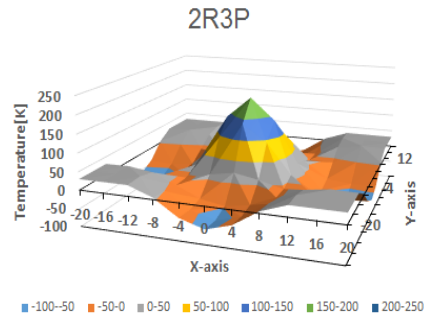


Fig. 8. Temperature error distribution at high temperature zones using Two-ratios-three-peaks (2R3P)

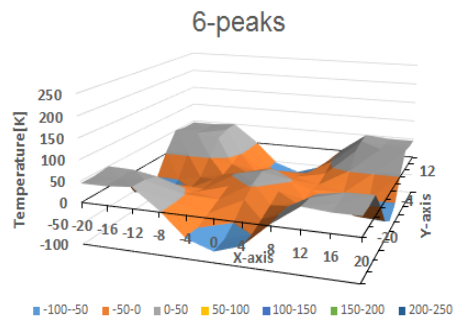


Fig. 9. Temperature error distribution at high temperature zones using 6-lines-profiles fitting (6-peaks)

를 저온부, 고온부로 나누어 모델링하였다. 저온부의 온도범위는 300-700 K로 가정하였고, 고온부는 300-1,000 K이다. Fig. 7과 같이 생성된 가상 온도장데이터와 각 알고리즘으로 해석된 온도장데이터의 차를 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 저온부에서 온도 오차범위는 -29.8~34.4 K, 고온부에서는 -62.9~200.3 K로 나타났고 중심부 온도 오차는 저온부에서 3%, 고온부에서는 20%로 측정되었다. 이에 반해 6-peaks 알고리즘 적용시 저온부 온도 오차범위는 -64.3~50.6 K, 고온부 온도 오차범위는 -74.1~50.1 K였으며 중심부 온도오차는 저온부와 고온부 모두 2%로 측정되었다. 6점 최적화 알고리즘(6-peaks algorithm)이 2R3P알고리즘에 비해 측정성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 보고에서는 6-peaks법을 적용하여 레이저빔 배열방식에 따른 측정성능을 평가하였다.

2.4 온도장 재구성 알고리즘

일반적으로 TDLAST 측정시스템은 측정대상인 가스통로부, 반도체레이저 발생부 그리고 가스통로부를 지나 반대편에 설치된 검출부(detector)로 구성된다. 검출부에서 얻어진 레이저 빔의 흡수스펙트럼 신호를 이용하여 가스통로부에서의 온도분포와 농도분포를 알아내기 위해 computed-tomography (CT)의 재구성 알고리즘으로서 multiple algebraic reconstruction technique (MART)법^{8,9)}을 사용하였다. MART법은 실험을 통해 측정된 흡수스펙트럼 신호와 이론적으로 구해진 흡수스펙트럼 신호와의 오차가 최소값에 수렴할 때까지 계산하는 알고리즘으로 아래 식 (5)를 이용하여 계산하였다.

$$\alpha_{\lambda,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{\lambda,i}(i)^{(k)} \times \left[\frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (5)$$

$\alpha_{\lambda,i}$ 는 흡수계수, $A_{\lambda,j}$ 는 측정된 흡수량, L 은 흡수선의 길이, β 는 수렴 속도를 빠르게 $\alpha_{\lambda,i}$ 해주는 가중치(relaxation parameter, $0 < \beta < 1$)이다. 아래 첨자 λ, i, j 는 각각 파장, 셀 번호, 레이저 빔의 path 번호를 의미한다. 각 계산(Iteration)마다 가로열, 세로열 순번으로 계산을 반복한다. 초기 값 선정에는 각 셀에서의 초기값들을 더해주는 방법인 additive line of sight (ALOS)와 곱해주는 방법인 multiplicative line of sight (MLOS)가 있는데, 본 연구에서는 식 (6)으로 나타낼 수 있는 ALOS법을 적용하였다.

$$A_{i,j} = \frac{A_i + A_j}{2} \quad (6)$$

$A_{i,j}$ 는 수평방향 레이저 빔에 해당되는 A_i ($i=1, 2, \dots$) 흡수스펙트럼과 수직방향 레이저 빔에 해당되는 A_j ($j=1, 2, \dots$) 흡수스펙트럼의 합의 평균을 나타낸다. 예를 들어, 측정영역에서의 격자점(2, 3)에 해당되는 위치에서의 흡수스펙트럼 $A_{2,3}$ 의 초기치를 2번째 수평방향 레이저 빔과 3번째 수

직방향 레이저 빔의 합의 평균치로 사용하였다.

3. 레이저 빔 최적 배치 선정

3.1 레이저 빔 배열의 종류

TDLAST에 의한 온도분포, 농도분포 측정 결과의 값들은 레이저 빔 배치상태(배치 개수, 가로 세로 직각배열, 추가 대각선 배열)에 따라 차이가 나타나게 되는데, 본 연구에서는 레이저 빔 배치 개수와 가로 세로 레이저 빔의 직각배열과 대각선 방향으로 추가되는 레이저 빔 배열에 따른 측정오차를 평가하였다.

사용된 레이저 빔의 총 개수가 16개로 한정되었을 때, 레이저 빔의 배열을 가로×세로가 8개씩 배치된 8×8의 경우를 case 1 (Fig. 10[a]), 대각선 방향으로도 배치하였을 경우인 5×5×6을 case 2 (Fig. 10[b]), 대각선 방향을 하나 더 추가하였을 경우인 4×4×4×4를 case 3 (Fig. 10[c])의 경우에 있어서 측정 결과에 대한 오차를 평가하였다.

레이저 빔의 배열 개수를 가로×세로가 각각 49개

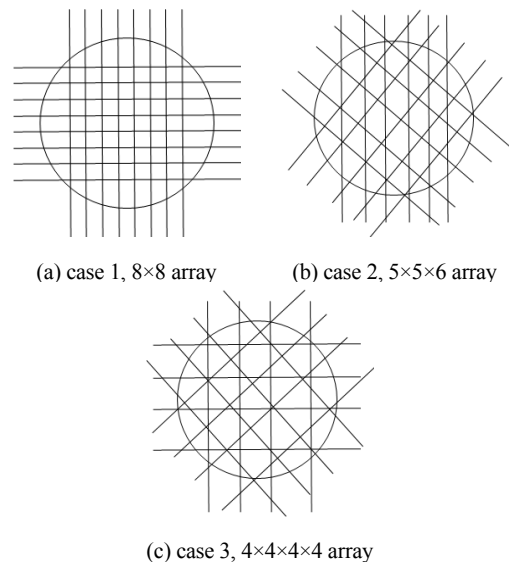


Fig. 10. Three different arrangements using 16 laser beams . (a) case 1, 8×8 array, (b) case 2, 5×5×6 array, (c) case 3, 4×4×4×4 array

씩 배열한 경우를 case 4 (49×49), 여기에 대각선 방향을 한 개 추가한 경우를 case 5 (49×49×97), 대각선 방향을 하나 더 추가한 경우를 case 6 (49×49×97×97)로 하였고, 레이저 빔의 개수를 줄인 경우에 해당되는 11×11의 경우를 case 7, 한쪽의 대각선 방향을 포함하는 11×11×11의 경우를 case 8, 양쪽 대각선 방향 모두 포함하는 11×11×11×11의 경우를 case 9로 간주하였다. 위와 같이 여러 가지 레이저 빔의 배열에 대한 실험을 진행하기에는 셀 제작, 다수의 collimator 등 많은 실험장비가 요구되고 장치세팅에도 오랜 시간이 걸리기 때문에 경제적, 시간적으로 비효율적이다. 따라서 가상데이터를 이용한 TDLAST의 측정성능평가는 의의가 크다고 하겠다.

3.2 측정 결과 분석

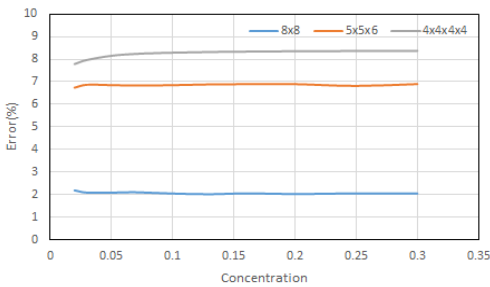
가상 온도데이터의 범위를 300-700 K로 설정하였고, 가상의 H₂O 농도를 0.025-0.3로 변화시켰다. 이들을 이용하여 상기 레이저 빔 배열에 따른

TDLAST 측정 결과로부터 측정오차의 평균값을 비교하였으며 오차평균은 식 (7)과 같다. T는 온도, C는 농도를 나타낸다.

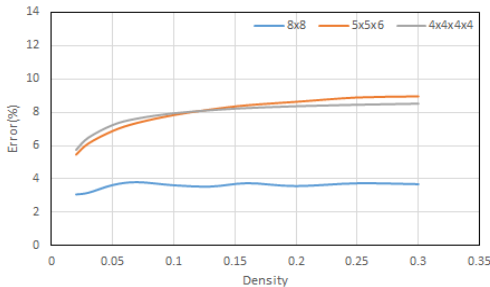
$$Mean\ Error[\%] = \frac{Virtual\ T\ or\ C - Measured\ T\ or\ C}{Virtual\ T\ or\ C} \times 100 \tag{7}$$

Fig. 11은 레이저 빔의 개수가 16개일 때, 가로세로 방향 직각으로 8×8개 배열한 case 1의 경우에서의 온도와 농도측정 오차를 나타낸다. 가로세로 직각배열의 경우가 나머지 두 배열 case 2, case 3의 경우보다 측정오차가 확연히 적은 것을 알 수 있다.

또한, case 1의 경우 농도가 증가할 때 온도측정 오차는 거의 일정하지만 case 2와 case 3의 경우 오차가 증가하는 경향을 보였다. 한편, 온도분포를 임의로(random) 발생시켜 작성된 가상온도분포에 대하여 각각의 레이저 빔의 배열에 의한

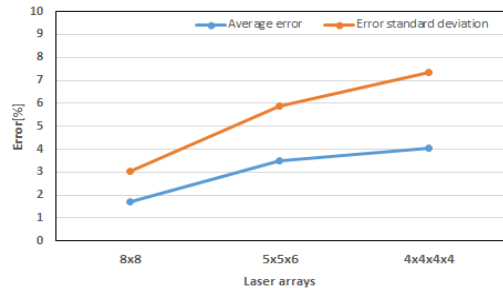


(a) for concentration

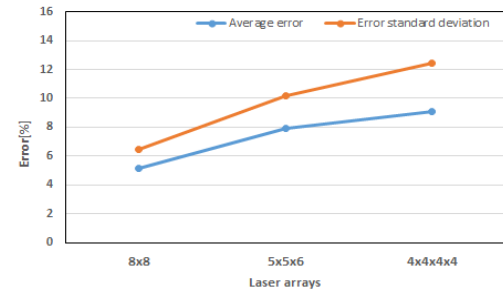


(b) for temperature

Fig. 11. Measurement error of average values (16 laser beams). (a) for concentration, (b) for concentration

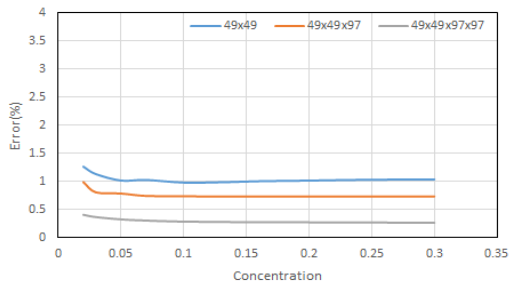


(a) for concentration

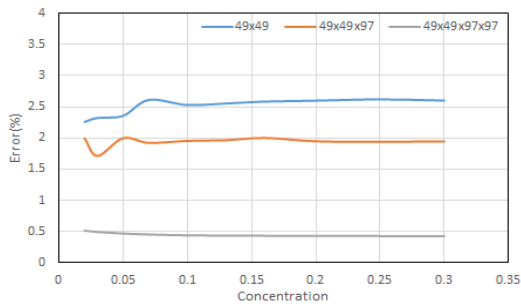


(b) for temperature

Fig. 12. Measurement error of average values and standard deviations for different laser beam arrangements (16 laser beams). (a) For concentration, (b) for temperature



(a) for concentration

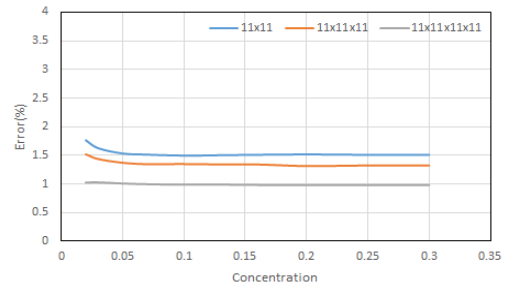


(b) for temperature

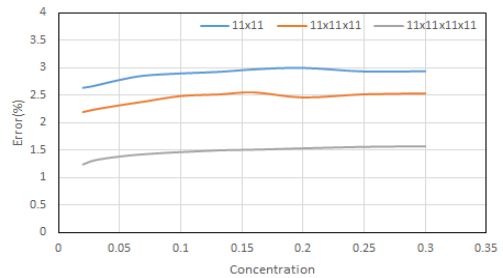
Fig. 13. Measurement error dependences on the number of laser beams. (a) For concentration, (b) for temperature

측정오차를 비교 분석하였다. 그 결과, 온도와 농도오차의 평균값과 표준편차는 case 3의 경우가 가장 크게 나타났으며 다음으로는 case 2이었고 case 1의 경우가 가장 좋은 결과를 보였다. 즉, 동일한 개수의 레이저 빔을 사용시 대각선 방향으로 배열하는 것보다 가로 세로 직각배열로 레이저 빔 개수를 늘려서 측정하는 것이 측정오차가 적음을 알 수 있다.

Fig. 12는 case 1, case 2, case 3에 대한 측정오차의 평균값과 표준편차를 나타낸다. 동일한 레이저 빔의 개수일 때 가로 세로 직각배열에 해당되는 case 1의 경우가 대각선 방향의 레이저 빔을 설치한 경우보다 측정값의 평균값과 표준편차가 적음을 알 수 있다. 한편, 농도값이 증가할 때 측정온도의 오차에 있어서, 가로 세로 직각배열(case 1)은 거의 일정한 값을 보이지만 대각선 방향 레이저 빔의 배열의 경우(case 2, case 3)는 오차가 증가하는 경향을 보였다. 이상의 결과들은 측정영역의 중심부에서 주변부로 갈수록 온도가



(a) for concentration



(b) for temperature

Fig. 14. Measurement error dependences on the number of laser beams (11×11, 11×11×11, 11×11×11×11). (a) For concentration, (b) for temperature

낮아지는 경우인데, 온도분포가 중심부가 아닌 주변부에 존재할 때의 측정값의 오차특성을 평가하기 위하여 가상온도 데이터를 난수(random number)로 발생시켜 각각의 배열에 대한 오차특성을 비교하였다.

그 결과, 온도와 농도에 대한 측정오차의 평균값과 표준편차는 case 3의 경우가 가장 크게 나타났으며 다음으로는 case 2였고 8×8의 경우가 가장 좋은 결과를 보였다. 즉, 동일한 개수의 레이저 빔을 사용할 경우 대각선 방향의 레이저 빔을 배치하는 대신에 가로와 세로 직각배열로 레이저 빔 개수를 늘려서 측정하는 것이 측정오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

다른 경우로, 레이저의 개수가 늘어나는 경우, case 4, case 5, case 6 세 가지 경우에서 농도 변화에 따른 농도와 온도 오차를 평균을 비교한 결과는 Fig. 13과 같다. 레이저 개수가 늘어날수록 농도와 온도 오차율 평균값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특징은 한 방향의 대각선 성분이 추

가되었을 때 다소 오차가 감소되지만 큰 영향은 없지만 대각선 성분이 총 두 방향으로 될 때 오차가 확연히 줄어든 것을 알 수 있었다. 즉, 대각선 성분이 추가되더라도 한 쪽 방향으로는 충분한 데이터를 얻지 못하므로 정확한 온도분포 농도분포 산정이 불가하다.

이전 경우와 비교하여 레이저 개수가 줄어든 case 7, case 8, case 9의 결과는 Fig. 14와 같고 case 4-6과 비교시 농도의 평균오차는 최소 1.48배에서 최대 3.25배의 오차를 가졌으며 온도 평균오차는 최소 0.45-2.50배로 측정되었다. 마찬가지로 레이저 개수가 늘어나면 해석의 정밀도가 증가함에 따라 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

레이저흡수분광 토모그래피법(TDLAST)을 이용한 가스유동장의 온도분포와 농도분포를 측정함에 있어서 레이저 빔의 배치에 따른 측정오차 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 사용되는 레이저 빔의 개수가 동일할 경우, 가로 세로 직각배열이 대각선 방향으로 레이저 빔을 설치한 경우보다 측정오차가 적었다.

2) 레이저 빔의 개수가 많을수록 측정 결과의 오차는 적었다. 이는 측정영역에 대한 정보량이 증간 것에 비유될 수 있다.

3) 상기 두 가지 대표적 특성은 측정영역의 중심부 온도가 가장 높고 그 주변이 낮은 가우시안(gaussian) 형태의 온도분포에 대한 것이다. 그러나 그 밖의 온도분포를 상정한 난수(random number)를 이용한 가상온도 데이터를 이용한 온도측정에 있어서도 레이저 빔 배열을 가로 세로 직각으로 배열하는 것이 측정오차가 가장 적었다.

위의 결과는 레이저 빔 배치에 있어서 투입되는 시간과 비용을 최소화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 중견핵심과제 (No.2015R1A2A2A01006803), 지역혁신창의인력양성사업(No.2015H1C1A1035890), 중견연구자지원사업(No.2017R1A2B2010603), 중소기업융합기술개발사업 (S2415805), 중소기업융합기술개발사업(S2356988)의 지원에 의하여 수행되었다.

References

1. Y. Deguchi, "Industrial applications of Laser Diagnostics", CRS Press: Taylor & Francis, 2011.
2. Y. Zaatar, J. Bechara, A. Khoury, D. Zaouk, and J. P. Charles, "Diode Laser Sensor for Process Control and Environmental Monitoring", Applied Energy, Vol. 65, 2000, pp. 107-113.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol. 110, No. 9-10, 2009, pp. 533-572.
8. M. Jiang and G. Wang, "Convergence of the simultaneous algebraic reconstruction technique (SART)", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 12, No. 8, 2003, pp. 957-961.
 9. T. Kamimoto, Y. Deguchi, and Y. Kiyota, "High temperature field application of two dimensional temperature measurement technology using CT tunable diode laser absorption spectroscopy", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 46, 2015, pp. 51-57.