

# 레이저흡수분광법(TDLAS) 기반 가스온도분포 산정을 위한 상호상관계산 알고리즘 개발

최두원<sup>1,4</sup> · 김광남<sup>2</sup> · 조경래<sup>3†</sup> · 심준환<sup>1</sup> · 김동혁<sup>3</sup> · Yoshihiro Deguchi<sup>4</sup> · 도덕희<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>한국해양대학교 전자통신공학과, <sup>2</sup>한국해양대학교 대학원 에너지플랜트과, <sup>3</sup>한국해양대학교 공과대학 기계공학부,

<sup>4</sup>Tokushima University, Graduate School of Advanced Tech. & Science

## Developments of a Cross-Correlation Calculation Algorithm for Gas Temperature Distributions Based on TDLAS

DOOWON CHOI<sup>1</sup>, KWANGNAM KIM<sup>2</sup>, GYONGRAE CHO<sup>3†</sup>, JOONHWAN SHIM<sup>1</sup>,  
DONGHYUK KIM<sup>3</sup>, YOSHIHIRO DEGUCHI<sup>4</sup>, DEOGHEE DOH<sup>3†</sup>

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

<sup>2</sup>Dept. of Energy Plants Eng., Graduate School, Korea Maritime & Ocean Univ., 1 Dongsam-dong, Youngdo-gu,  
Busan 606-791, Korea

<sup>3</sup>Division of Mechanical Eng., Korea Maritime & Ocean Univ., 1 Dongsam-dong, Youngdo-gu, Busan 606-791, Korea

<sup>4</sup>Graduate School of Advanced Tech., & Science, Tokushima Univ., Tokushima 770-8560, Japan

**Abstract** >> Most of reconstruction algorithms for the calculation of temperature distributions in CT (computed tomography)-TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy) are based upon two-line thermometry method. This method gives unstable calculation convergence due to signal noise, bias error, and signal mis-matches. In this study, a new reconstruction algorithm based on cross-correlation for temperature calculation is proposed. The patterns of the optical signals at all wave lengths were used to reconstruct the temperature distribution. Numerical test has been made using phantom temperature distributions. Using these phantom temperature data, absorption spectra for all wave lengths were constructed, and these spectra were regarded as the signals that would be obtained in an actual experiments. Using these virtually generated experimental signals, temperature distribution was once again reconstructed, and was compared with those of the original phantom data. Calculation errors obtained by the newly proposed algorithm were slightly large at high temperatures with small errors at low temperature.

**Key words** : CT(컴퓨터토크로그래피), TDLAS(레이저흡수분광법), Cross-Correlation(상호상관), Numerical Test(수치적 시험), Phantom Temperature(가상 온도)

### Nomenclature

A : absorbance

$G_j$  : line broadening function of laser line j

I : intensity of laser light

<sup>†</sup> Corresponding authors : doh@kmo.ac.kr, vpascal@paran.com

Received : 2016.2.3 in revised form : 2016.2.14 Accepted : 2016.2.28

Copyright © 2016 KHNES

- L : path length [mm]  
 Q : partition function  
 $n_i$  : number density of species I  
 $\alpha$  : absorption coefficient  
 $\rho$  : relaxation coefficient

## Subscripts

- i : species  
 j : laser beam number  
 $\nu_i$  : representative peak wave of species I  
 $\lambda$  : wave length [nm]

## 1. 서 론

유엔기후협약인 교토의정서의 공식효력이 발하면서, 2013년 1월 1일부터는 온실가스 감축량을 의무적으로 지켜야 하는 상황이다. 선박의 경우에는 글로벌하게 통항하는 관계로, 특별히 규제가 강한 상황이다. 그리하여 2013년 1월 1일부터 건조되는 선박은 국제해양오염방지협약에 의거하여 선급으로부터 에너지효율증서(IEE, international energy efficiency)를 발급받아 소지해야만 항행이 가능한 상황이다. 이는 선박배기가스 배출량의 측정 또는 배기가스 측정기술의 필요성을 시사한다고 볼 수 있다.

한편, 선박배기 가스의 성분분석을 위한 기존의 측정방식은 접촉식이면서 배기관에 설치된 가스센서에 의한 1점(pointwise) 측정방식이어서 가스배출량을 산정할 수 없다. 즉, 선박배기관의 경우 그 직경이 매우 커서 가스농도가 불균일한 상태로 배출되는 경우가 대부분인데, 이러한 상황에서 1점 센서에 의거하여 배출량을 산정한 결과에 대해서는 신뢰성이 낮을 수밖에 없다.

한편, TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy, 레이저흡수분광법)와 CT (computed tomography)를 이용하여 연소가스의 2차원 온도와 농도분포를

산정하는 연구가<sup>1-3)</sup> 진행된 바 있는데, 이들 연구에서는 가스분자가 특정파장에서 흡수될 수 있도록 가변파장반도체레이저를 이용하여 얻어진 빔(beam)형 레이저의 2차원적 배열로부터 CT계산을 수행함으로써 연소가스의 횡단면상에서의 온도분포를 산정하고 있다. 이들 방식에 의한 온도분포산정 방식은 가스의 특정파장에서의 레이저빔 흡수강도(absorption intensity)의 최대값(peak value)들의 비(ratio)를 이용하는 관계로, 고온부에서의 오차가 클 뿐만 아니라, 노이즈가 포함된 측정신호로부터 최대값을 찾아내기란 용이하지 않은 단점이 있다.

본 연구는 직경이 큰 배기관을 통과하는 배기가스의 배출량을 보다 정확하게 계산하는데 필요한 단면상의 온도분포를 산정함에 있어서, 특정파장에서만의 레이저빔 흡수강도의 최대값대신에 모든 파장에서의 흡수강도 신호들의 패턴(pattern)을 매칭(matching)시켜 온도분포를 재구성할 수 있는 새로운 계산알고리즘 개발에 관한 내용을 담고 있다.

## 2. TDLAS원리

TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy)는 가스분자의 온도와 농도를 측정하고자 할 때 사용되며, 이 이론은 Fig. 1에 나타난 Lambert-Beer의 법칙을 기반으로 하는데, 입사광과 투과광의 강도는 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_\lambda / I_{\lambda 0} &= \exp\{-A_\lambda\} \\
 &= \exp\left\{-\sum_i (n_\lambda L \alpha_\lambda)\right\} \\
 &= \exp\left\{-\sum_i \left(n_\lambda L \sum_j S_{i,j}(T) G_{\nu_i,j}\right)\right\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $I_\lambda$ 은 투과되어진 빛의 강도를,  $I_{\lambda 0}$ 은 입사광의 초기강도를 나타내고,  $A_\lambda$ 는  $\lambda$ 파장을 가진 빛의 흡수량을,  $n_i$ 는 가스분자의 수밀도 (number density)

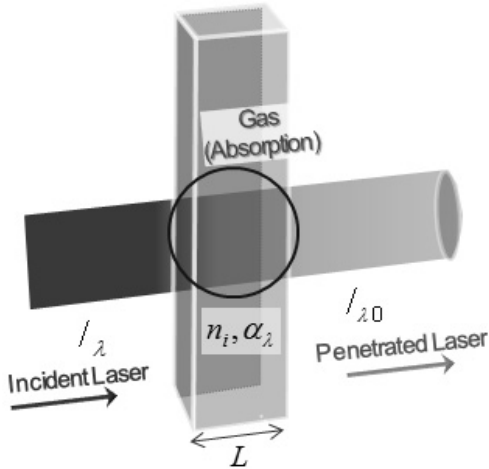


Fig. 1 Schematic diagram of Lambert-Beer's law

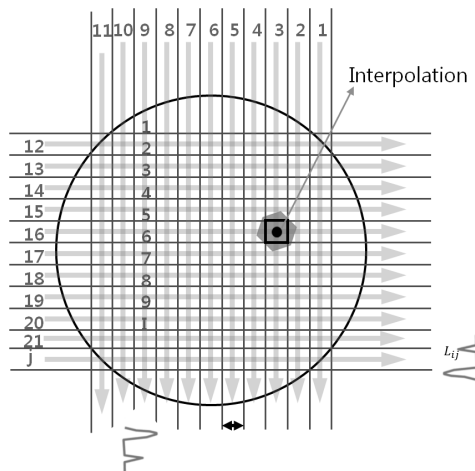


Fig. 2 Analysis grids and 22 beam paths

를,  $L$ 은 흡수가 일어나는 길이를,  $S_{ij}(T)$ 는 흡수레이저 빔  $j$ 에서 분자의 온도에 따른 선강도를 나타낸다. 여기서, 선강도는 온도 함수임을 알 수 있다.  $G_{vij}$ 는 선폭 넓어짐에 관여하는 선형함수를 나타낸다. 빛이 흡수 매체(가스)로 스며들 때, Lambert-Beer의 법칙에 따라 흡수 및 투과된 빛의 세기는 매체의 농도와 관련이 있으며,  $\alpha_\lambda$ 는 가스의 농도와 온도의 함수로 나타내는 흡수계수(absorption coefficient)이다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 레이저 빔을 2차원 배열로 배열된 것을 나타낸다. 이 2차원 배열의 레이저 빔은

가스의 단면 전체(흡수매체)를 향하여 배치되는데, 이들 배열의 교차점이 해석단위 셀(cell)이 된다. 본 논문에서 사용된 온도 및 가스농도장(수밀도를 나타냄)은  $11 \times 11$  (121 cell)의 정사각형 mesh로 구성되어 있으며, 셀의 단위길이( $L$ )는 4 mm이다. 셀 영역으로 지나가는 레이저 path의 흡수량은 다음의 식으로 구하였다<sup>4,5</sup>.

$$A_j = \sum_i L_{i,j} \alpha_{i,j} \tag{2}$$

여기서,  $A_j$ 는  $j$  레이저 빔의 흡수량이고,  $j$ 레이저가 지나가는 모든 셀들의 흡수량의 합을 나타낸다.

### 3. 패턴매칭(pattern matching)에 의한 온도계측 방법

CT-TDLAS법에 의한 가스의 온도분포를 계산함에 있어서 ART(algebraic reconstruction tomography) 법<sup>1-5</sup>)과 MART(multiplicative algebraic reconstruction tomography)법<sup>6</sup>)에 의한 계산이 주를 이루어 왔다. 이들의 연구는 흡수계수와 온도와의 관계를 이용하는 것으로, 특정주파수에서 흡수값의 비(ratio)가 선형적으로 변한다는 것을 이용하여 온도를 계산하는 방식을 따르고 있다. 측정된 가스 흡수강도에 관한 측정 데이터로부터 특정주파수에서의 최대값 몇 점만을 이용하는 관계로, 원래의 실험측정 데이터를 활용하지 못함으로 인한 오차를 배제할 수 없는 단점이 있다. 또한, 이들 방식은 적은 수의 레이저 배열을 이용한 정보를 이용하는 관계로 온도분포를 계산하기 위하여 많은 시간이 필요할 뿐만 아니라 계산결과에서도 높은 온도에서 큰 오차를 보이고 있다. 오차를 줄이기 위하여 많은 수의 레이저 배열을 이용하면 되지만 고비용과 많은 설치시간이 필요하게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 레이저 빛의 흡수강도가 높은 몇몇 점을 이용하는 대

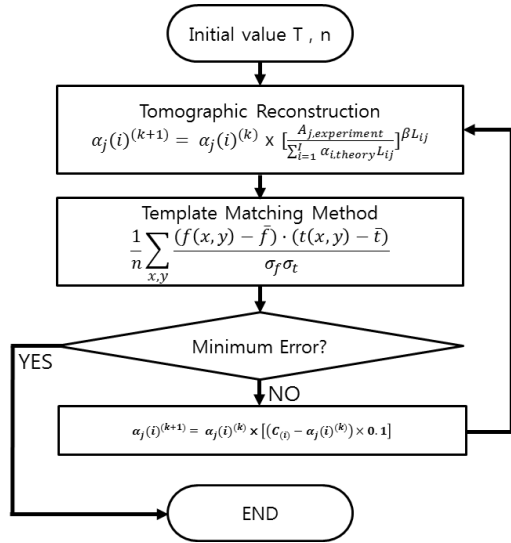


Fig. 3 Flow chart of pattern matching algorithm

신에, 계측구간 내에 있는 모든 파장의 흡수강도를 이용하여 온도와 농도를 계산함에 있어서 정도를 향상시키는 것에 연구의 목적이 있다.

Fig. 3은 본 연구에서 개발된 알고리즘의 흐름도를 보여주고 있다. 그림과 같이 다음 단계를 거치면서 오차가 최소인 온도분포를 구하게 된다.

### 3.1 초기 온도 및 농도 결정

CT와 같이 일반적으로 재구성 알고리즘(reconstruction algorithm)에서는 초기값은 결과에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 기존의 연구에서 많이 사용되는 MLOS(multiply line of sight) 기법<sup>7)</sup>을 사용하여 초기 흡수값을 결정하여 재구성 계산을 실시하였다.

### 3.2 온도분포 재구성(Tomographic Reconstruction)

Tomographic Reconstruction 방법은 많은 연구분야에서 널리 많이 사용되어지는 MART (Multiplicative algebraic reconstruction technique)법을 사용하여 재구성 하였다. 이 방법은 주어진 흡수값과 Laser를 따라 함으로 구해진 흡수값의 오차가 최소가 되도록 반

복 계산하는 방법으로 식 (3)을 적용하여 계산하였다.

$$\alpha_j(i)^{(k+1)} = \alpha_j(i)^{(k)} \times \left[ \frac{A_{j,experiment}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{i,theory} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (3)$$

여기서, 첨자 i는 격자 셀, j는 각 레이저, k는 반복 횟수를 의미한다.  $\alpha$ 는 각 셀에서의 흡수계수, A는 각 레이저에서의 흡수량,  $\beta$ (relaxation coefficient)는 수렴가중치로 본 연구에서는 0.1을 사용하였으며, L은 레이저가 통과한 길이를 나타낸다.

### 3.3 패턴매칭(Pattern Matching)

계산된 각 셀(cell)에서의 흡수값으로부터 온도를 구하기 위해, 흡수값 중 최대값을 보이는 두 파장에서의 비를 사용하는 방법(two line thermometry)<sup>1-3)</sup>에서는 특정 두 개의 주파수의 흡수값의 비가 선형 비례하는 특성을 이용하기 때문에 쉽게 온도를 구할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 이론계산에서 높은 정도를 얻을 수 있으나, 실제 실험에서 발생되어지는 잡음, 계측장비의 오차, 또는 계측된 데이터로부터 원하는 주파수상에서의 흡수값으로 변환할 때 생기는 오차들에 의하여 측정신호에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 오차를 줄이고 계측 정도를 높이기 위해서 보다 많은 파장에서의 정보를 사용하여 온도를 구할 필요가 있다.

본 연구에서는, 계측영역내의 모든 파장의 흡수값을 사용하여 온도를 구하였다. 이를 위해, 농도가 1일 때, 270~1000°K 까지의 온도를 5°K 간격으로 147개 파장에 따른 흡수값들의 분포테이블 Table 1과 식 (1)을 이용하여 구하였다.

Table 1은 HITRAN2008 database<sup>8)</sup>에서 제공하는 H<sub>2</sub>O의 파장 및 흡수강도 값으로 본 연구에서는 파장이 1388.0~1388.6 사이의 40개의 모든 값을 사용하였다. 농도 및 온도가 정해지면 다음 식을 이용하여

**Table 1** Information of selected spectrum lines of H<sub>2</sub>O vapor at reference temperature

Frequency [cm-1]	Wavelength [nm]	Line-Strength [cm <sup>-1</sup> ·atm <sup>-1</sup> ]	E [cm <sup>-1</sup> ]
7202.037	1388.496	9.18x10-10	3224.546
7202.060	1388.492	2.74x10-10	2495.166
7202.087	1388.486	3.56x10-4	136.1639
7202.256	1388.454	2.74x10-2	446.5107
7202.327	1388.440	3.76x10-5	488.1077
7202.448	1388.417	4.08x10-10	3135.764
7202.494	1388.408	9.78x10-10	2670.79
7202.583	1388.391	3.04x10-6	1201.921
7202.700	1388.368	1.64x10-7	1411.642
7202.722	1388.364	5.75x10-8	1817.451
7202.805	1388.348	1.07x10-9	3870.224
7202.909	1388.328	1.15x10-1	70.0908
7202.911	1388.328	5.27x10-10	3216.193
7202.999	1388.311	1.68x10-6	1819.335
7203.037	1388.303	2.25x10-9	2586.529
7203.239	1388.264	8.58x10-8	2630.192
7203.265	1388.259	3.78x10-8	2053.969
7203.376	1388.238	1.74x10-9	3736.171
7203.450	1388.224	5.40x10-8	2552.857
7203.479	1388.218	5.30x10-10	2490.354
7203.635	1388.188	3.26x10-8	446.6966
7203.658	1388.184	1.58x10-4	1742.306
7203.763	1388.163	1.18x10-7	1131.776
7203.784	1388.159	8.38x10-6	2000.863
7203.822	1388.152	3.48x10-5	446.5107
7203.824	1388.152	3.91x10-10	4016.115
7203.890	1388.139	5.65x10-2	742.0762
7203.894	1388.138	1.88x10-2	742.073
7203.935	1388.130	4.53x10-4	285.4186
7203.950	1388.127	1.77x10-6	1050.158
7203.968	1388.124	9.65x10-7	2042.31
7204.030	1388.112	1.20x10-4	1640.506
7204.053	1388.107	1.65x10-9	3299.991
7204.069	1388.104	4.83x10-9	1474.98
7204.135	1388.092	1.70x10-5	1772.414
7204.166	1388.086	7.89x10-3	931.237
7204.232	1388.073	2.86x10-9	3058.398
7204.353	1388.050	4.63x10-7	2439.954
7204.426	1388.036	1.21x10-8	2248.063
7204.546	1388.013	3.36x10-8	1525.135

온도에 따른 주어진 파장에서의 흡수값을 구할 수 있다.

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(\frac{-hcv_0}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hcv_0}{kT_0}\right)\right]^{-1} \quad (4)$$

여기서, h[j·s]는 프랑크 상수, c[cm/s]는 빛의 속도, k[J/K]는 볼츠만 상수, Q(T)는 분자의 에너지 상태량에 관계하는 온도에 관한 4차식 분배함수이다<sup>9)</sup>. 또, HITRAN에서 제공되어지는 정보는 주어진 파장에서의 선값이므로 Voigt profile을 적용하여 실험을 통해 얻어지는 흡수패턴으로 수정하였다. 온도에 의해 구해진 흡수패턴은 농도가 1일 때의 값이므로 실제 계산된 흡수패턴과 큰 차이를 가진다. 이를 개선하기 위해서 계산된 흡수값의 모든 파장대의 총합을 온도의 총합으로 크기를 조정한 후 식 (5)와 같이 나타난 상호상관 값을 계산하여 이 값이 가장 클 때 흡수패턴(실험상에서 얻어지는 패턴)과 식 (4)를 이용하여 얻어지는 이론상의 패턴이 일치하는 것으로 간주하였다.

$$C_{at} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha}_i) (t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}} \quad (5)$$

여기서, 첨자 i 계측영역에서의 파장값으로 1388.0~1388.6을 약 340 등분하여 사용하였으며, α는 계산된 흡수값, t는 주어진 온도에서의 이론 흡수값이며, C는 상호상관 계수값으로 완전히 같은 패턴이면 1, 완전히 반대 패턴이면 -1의 값을 가진다. 모든 온도에 대해 상호상관을 계산 후 패턴이 제일 유사한 최대값을 구하였다. 또 구한 값은 5°K 간격의 테이블에서 얻어진 값이므로 주위 값을 이용한 2차 curve fitting을 사용하여 최적의 온도값을 구하였다.

### 3.4 오차 최소화 계산(Error Minimization)

온도분포의 재구성(reconstruction)에 있어서 수렴 여부를 판단하기 위해서 새롭게 구현된 상호상관 알고리즘의 오차계산에는 다음 식 (6)을 이용하였다.

$$Error = \sum_j \{ (A_{\lambda,i})_{theory} - (A_{\lambda,i})_{experiment} \}^2 \quad (6)$$

오차계산에서의 수렴조건으로서 계산된 온도 값의 변화가  $10E^{-20}$ 보다 적으면서 그 값이 변하지 않을 때까지 반복계산을 수행하였다. 수렴조건을 만족하지 않을 경우, 구해진 온도값을 이용하여 새로운 흡수값을 구하고, 셀에서의 흡수값과의 오차의 10% 만큼 셀에서의 흡수계수를 수정하고 수렴될 때까지 b~d 과정을 반복 수행하였다.

## 4. 이론데이터에 의한 성능평가

본 연구에서 개발되어진 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 11 x 11의 격자 및 식 (7)의 가우시안 분포 (gaussian distribution)를 이용하여 가상(phantom)의 온도 데이터를 생성하였다.

$$T_{ij} = B \exp[-(i^2 + j^2)/\sigma^2] + T_0 \quad (7)$$

여기서 B는 최대 온도값으로서 600°K이고,  $T_0$ 는 최저온도로 300°K이며,  $\sigma = 2$ 를 사용하였다. Figure 4에 그 결과를 보여주고 있으며, 최저온도는 300°K이고, 최고온도는 600°K이다. 구해진 온도분포를 이용하여 22개의(가로 11, 세로 11) 가상의 레이저의 흡수값을 식 (1)과 식 (5)를 이용하여 계산하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 중심의 고온부를 지나는 Path 6 부분에서는 첫 번째 최대점이 가장자리의 온도값보다 큰 값을 보임을 알 수 있으며, 주어진 가상의 가우시안 분포에 따

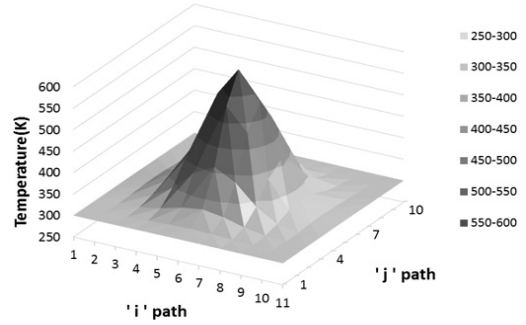


Fig. 4 Generated virtual temperature distribution

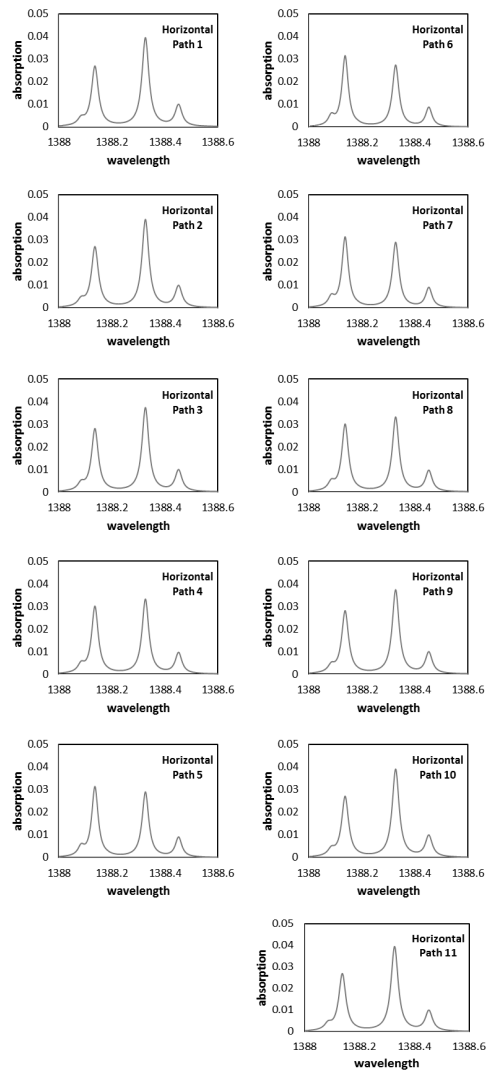


Fig. 5 The phantom absorption graphs of vertical lasers of H<sub>2</sub>O spectrum at 1338.0 ~ 1338.6 nm

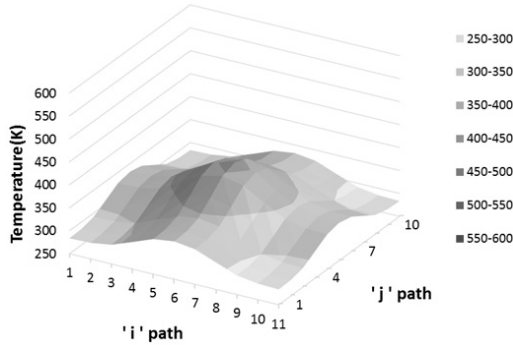


Fig. 6 Reconstructed temperature distribution

라 양쪽으로 대칭임을 알 수 있다.

Fig. 6은 개발된 알고리즘을 이용하여 재 구현한 온도 분포를 보여주고 있다. 중심부에서의 온도차는 600°K에 크게 못미치는 450°K값을 보였으며 주변 300°K에서는 275°K였다. 즉, 최대값에서는 약 150°K, 최소값에서는 약 25°K 정도의 오차가 있음을 알 수 있었다. 이는 온도가 높은 곳에서는 주변의 정보를 필요이상으로 많이 참조되어 계산된 관계로 오차가 크게 나타남을 알 수 있었으며, 향후 개선사항으로 남아 있다.

### 5. 맺음말

본 연구에서는 배기가스의 2차원 온도분포를 계측에 있어서 CT-TDLAS, MART법 및 흡수값의 패턴 비교(일명 상호상관계산알고리즘)를 통한 온도분포 계측 방법을 제안 및 개발하였다.

CT-TDLAS를 이용하여 가상(phantom)의 가우시안 온도분포를 가지는 데이터를 생성하는 방법을 제안하였으며 이를 이용하여 이론적인 Laser 흡수값을 구하는 방법을 제안하였다. 이어서 개발된 알고리즘으로 온도계측 성능평가를 수행하였다. 기존의 두 지점 계수비교에 의한 온도분포 계측기법(two line thermometry)에 비해 안정적 수렴 계산을 확보할 수 있었다.

계산된 결과로부터는 저온부에서는 온도계산상 상대오차가 약 8%로 확인되었으며 고온부에서는 약 25%였다. 고온부에서의 오차원인으로서의 측정점의 부족에 따른 것으로 판단되는데, 계측점의 증대 및 상관식의 개선을 통하여 오차를 줄일 수 있을 것으로 보인다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

1. Y. Deguchi, Industrial applications of Laser Diagnostics, CRS Press, Taylor & Francis, 2011.
2. M. Yamakage, K. Muta, Y. Deguchi, S. Fukada, T. Iwase, T. Yoshida, "Development of direct and fast response exhaust gas measurement," SAE Paper 20081298, 2008.
3. P. Wright, N. Terzijaa, J. L. Davidsona, S. Garcia-Castillo, C. Garcia-Stewart, S. Pegrumb, S. Colbourneb, P. Turnerb, S. D. Crossleye, T. Litt, S. Murrayc, K. B. Ozanyana, and H. McCanna, "High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine," Journal of Chemical Engineering, 158(1), pp. 2-10, 2010.
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. 21, 045301 (10pp), 2010.
5. L. Ma and W. Cai : Numerical investigation of hyperspectral tomography for simultaneous temperature and concentration imaging, APPLIED OPTICS, 47(21), pp. 3751-3759, 2008.

6. 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, No. 1, pp. 84-89, 2016.
7. G.E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, and B. W. van Oudheusden. Tomographic particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, Vol. 41, pp. 933-947, 2006.
8. L.S. Rothman, I.E. Gordon, A. Barbe, D. ChrisBenner, 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. Lacombe, 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. VanderAuwera, "The HITRAN2008 molecular spectroscopic database," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 110, pp. 533-572 2009.
9. R. R. Gamache, S. Kennedy, R. Hawkins, L. S. Rothman, *Journal of Molecular Structure* 517-518 pp. 407-425, 2000.