

CT-레이저흡수분광법(TDLAS) 성능향상을 위한 레이저 선폭확장 함수 최적 계수 선정에 관한 연구

최두원¹ · 조경래^{2†} · Yoshihiro Deguchi² · 백태실³ · 도덕희^{1†}

¹한국해양대학교 공과대학 기계공학부,

²Tokushima University, Graduate School of Advanced Tech. & Science,

³포항대학교 제철산업과

Study on Optimal Coefficients of Line Broadening Function for Performance Enhancements of CT-TDLAS

DOOWON CHOI¹, GYONGRAE CHO^{1†}, YOSHIHIRO DEGUCHI²,
TAESIL BAEK³, DEOGHEE DOH^{1†}

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

²Graduate School of Advanced Tech., & Science, Tokushima Univ., Tokushima 770-8560, Japan

³Dept. of Steel Industry, Pohang Univ., Pohang 37555, Korea

Abstract >> The performance of the CT-TDLAS (computed tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy) is strongly dependent upon the line broadening functions. The line of the laser beam used in the TDLAS is scattered by the natural broadening, the collisional broadening and the doppler broadening. The influence of the natural broadening to the experimental spectra obtained in the TDLAS is negligible. The influences of the collisional broadening and the doppler broadening to the experimental spectra are relatively large, in high pressure gas flows and in high temperature low pressure gas flows, respectively. In this study, optimal coefficients are proposed for the doppler broadening function by using the experimental data obtained in a flat burner test. The optimal coefficients were $\nu_j=0.16$ and $n=0.37$. Using these coefficients, the temperature and concentration distributions at the engine exhaust gas pipe have been calculated showing their validities.

Key words : CT-TDLAS(토모그래피-레이저흡수분광법), Collisional broadening(충돌확장), Doppler broadening(도플러확장), Flat burner(균일연소기), Engine exhaust gas pipe(엔진배기가스관)

Nomenclature

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

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

Received : 2016.12.1 in revised form : 2016.12.14 Accepted : 2016.12.30

Copyright © 2016 KHNES

Subscripts

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

1. 서 론

엔진 등에서 배출되는 NOx, COx, HC, SO₂와 같은 배기가스는 지구온난화와 대기환경의 오염을 일으키는 주성분으로 이를 저감시키기 위하여 국제기구는 각종 규제를 하고 있는 실정이다. TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy)는 빠른 응답성과 비접촉식으로 엔진 등으로부터의 배기가스의 2차원 온도장 및 농도장 측정을 가능케 하므로 최근에 연소장의 해석에 많이 적용되고 있다¹⁻⁶⁾. 특히, TDLAS 시스템에서 측정된 흡수 스펙트럼을 정확하게 커브 피팅(curve fitting)하여 온도와 농도로 환산하는 기술은 측정값의 신뢰도를 결정짓는데, 그 과정에서 스펙트럼의 선폭확장(line broadening)에 의한 영향이 크다. 지금까지 TDLAS 시스템에서는 온도장과 농도장을 CT (computed tomography)법으로 재구성(reconstruction)할 때, 레이저빔의 선폭확장은 일반적으로 이론적 또는 경험적으로 결정하여 왔다⁷⁻⁸⁾. 하지만, 실제 연소시스템에서는 연소과정에서 연소생성물과 불순물 등이 발생하게 되는데, 이들에 의하여 레이저빔의 흡수스펙트럼은 영향을 받게 된다. 이로 인하여 이론적인 선폭확장은 실제의 선폭확장과 다르게 되어, 온도장과 농도장 계산에 있어서 오차발생의 원인이 된다.

본 연구에서는 연소과정에서 발생하는 수증기(H₂O)의 특정 파장대(1388 nm 파장영역)에서의 흡수스펙트럼 특성을 이용하여 온도장과 농도장을 측정하는 CT-TDLAS (computed tomography based tunable diode laser absorption spectroscopy)법에 있어서, 흡수스펙

트럼의 선폭확장의 정도를 결정짓는 최적 계수를 선정함으로써, CT-TDLAS법을 이용한 온도장과 농도장 측정기술의 성능향상을 도모하는 것을 연구의 목적으로 삼고 있다.

2. CT-TDLAS에 의한 온도장 농도장 계산

2.1 레이저흡수분광법(TDLAS) 기본 이론

빛이 가스와 같은 흡수 매체를 통과할 때 흡수, 투과된 빛의 세기는 Beer-Lambert법칙에 의거하여 단위 부피당 기체의 입자수인 농도와 관련이 있으며, 흡수 레이저의 초기신호와 투과된 신호의 강도비를 나타내는 식 (1)로 나타낼 수 있는데¹⁻⁶⁾, 이하는 이를 기반으로 온도장과 농도장을 계산하는 과정을 나타낸다.

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

여기서, I_{λ} 은 투과되어진 빛의 강도, I_{λ_0} 은 입사광의 초기강도를 나타내고, 아래첨자 i, j는 각각 기체의 종, 흡수라인이며, $S_{i,j}$ 는 온도함수인 선강도(line strength), n_i 는 i종 기체의 수밀도(number density), L은 흡수길이를 나타낸다. $G_{v_i,j}$ 는 선폭함수(broadening function)이며, 본 연구에서 실험적으로 결정되어지는 요소이다. 온도함수인 선강도는 식 (2)로 계산될 수 있다.

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

여기서, T_0 는 표준온도(296K), E'' (lower state energy)는 저준위 에너지, h [J·s]는 플랑크상수, k [J/K]는 볼

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

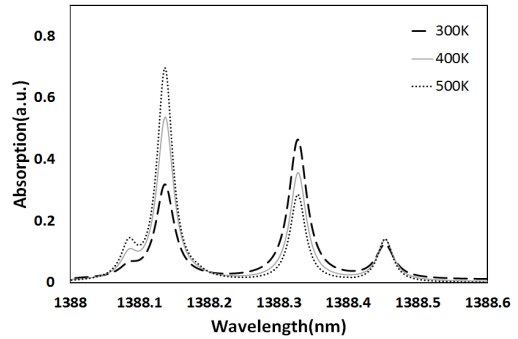
Frequency ν_0 [cm ⁻¹]	Wavelength λ [nm]	Line- Strength [cm ⁻¹ ·atm ⁻¹]	E'' [cm ⁻¹]
7202.255	1388.453	2.73×10^{-2}	446.51
7202.909	1388.326	1.15×10^{-1}	70.09
7203.658	1388.183	1.59×10^{-4}	1742.30
7203.903	1388.136	1.88×10^{-2}	742.08
7203.906	1388.135	5.65×10^{-2}	742.07
7204.166	1388.085	7.88×10^{-3}	931.24

츠만 상수, c [cm/s]는 빛의 속도, $Q(T)$ 는 분배함수 (partition function)이며 분자의 에너지상태량에 관계하는 4차식의 온도함수로 나타낸다⁹⁾. 본 연구에서는 수많은 선강도 값 중에서 무시해도 될 정도의 작은 선강도를 가지는 파장들은 제외시키고, 높은 선강도를 가지는 6개의 대표파장을 선정하였다. Table 1은 HITRAN2008database¹⁰⁾에서 제공하는 선정된 파장에서 H₂O의 선강도와 저준위에너지 값을 나타내는데, 본 연구에서 이를 이용하였다. Fig. 1은 이론적 선폭확장 함수를 적용한 1388nm 영역에서의 H₂O 흡수 스펙트럼을 나타낸다. 저온부와 고온부에서 흡수 스펙트럼의 변화도를 보여주고 있다.

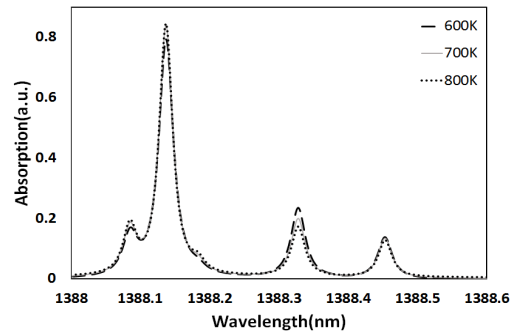
2.2 선폭확장 함수

실제 레이저빔에 의해 가스분자의 흡수가 일어날 때 스펙트럼의 선폭확장은 선형함수(line shape function)의 형태로 나타난다. 온도와 압력의 영향 및 분자 상호간의 충돌로 인하여 선폭확장이 일어나는데, 본 연구에서는 도플러 선폭확장(doppler broadening)과 분자상호간 충돌에 의한 선폭확장(collisinal broadening)의 영향을 모두 고려하여 절충된 모델인 Voigt 선형 함수²⁾를 이용하였다. 식 (3)은 도플러 선폭확장의 반폭을 결정하는 식이다.

$$\Delta V_d = 7.162 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (3)$$



(a) Low temperature region



(b) High temperature region

Fig. 1 Theoretical H₂O absorption spectra

ν_0 는 중심주파수에서의 파수 (wavenumber), T 는 온도, M 은 기체의 분자량을 나타낸다. 도플러 선폭확장은 주어진 조건에서 이론적으로 구할 수 있지만, 가스 분자간 충돌에 의한 선폭확장은 대상가스의 몰분율(mole fraction)과 압력 등의 영향으로 수정된 모델이 필요하다. 식 (4)는 충돌에 의한 선폭확장의 이론상 반폭(half width) 함수식을 나타내는데, 식 (5)와 같이 온도에 관한 함수로 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V_c &= P \sum_i X_i (2\gamma_i) \\ &= X_{air} 2\gamma_{air} + X_{H_2O} 2\gamma_{H_2O} \end{aligned} \quad (4)$$

$$2\gamma_i = 2\gamma_{i,T_0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_i} \quad (5)$$

여기서, P 는 기체의 압력, X_i 는 대상가스의 몰 분

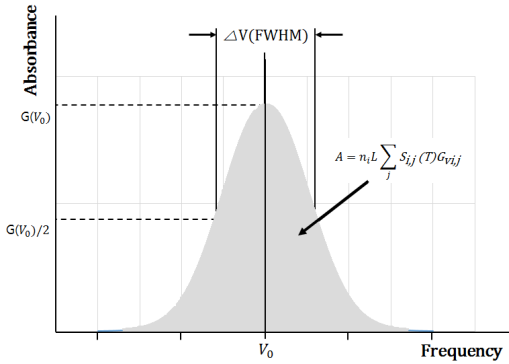


Fig. 2 Analysis grid and laser beam path

을, $\gamma_{i,T0}$ 와 n_i 는 각각 표준온도(296K)에서의 선평확장 계수(collisional broadening coefficient)와 온도의 존계수(coefficient of temperature dependence)이다. 위의 식에서 사용된 계수 값은 표준온도(296K)에서의 HITRAN2008database¹⁰⁾로부터 구하였으며 $\gamma_{air}=0.0534$, $\gamma_{H2O}=0.320$, $X_{air}=0.98$, $X_{H2O}=0.02$, $n_i=0.69^2)$ 를 사용하였다. γ_j 값과 n_j 값은 본 연구의 목적인 실험데이터로부터 구하기 위하여 선평확장 함수를 다음 식 (6)과 같이 간략화하였다.

$$\Delta V_c^* = \gamma_j (T_0/T)^{n_j} \tag{6}$$

한편, Fig. 2는 중심주파수가 v_0 인 흡수선(absorption line)의 전형적인 선형함수 그래프를 나타내는데, v_0 에서 최댓값을 가지며, 전체면적이 흡수량을 의미한다. 따라서 실험에서의 실질적 선평확장을 고려한 흡수스펙트럼에 대한 커브피팅(curve fitting)이 이루어져야 측정대상 가스의 온도장과 농도장을 재구성할 수 있다.

2.3 재구성 계산(Reconstruction Calculation)

CT-TDLAS법에 있어서 온도장과 농도장을 재구성에는 MART (Multiplicative algebraic reconstruction technique)법⁵⁾을 사용하였다. 실험으로부터 얻어진 흡

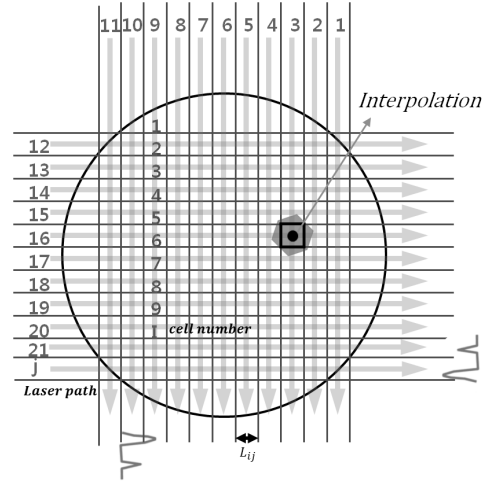


Fig. 3 Analysis grid and laser beam path

수스펙트럼의 흡수량과 이론적으로 구해진 흡수량의 오차가 최소가 되도록 반복계산 방법으로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{\lambda,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{\lambda,i}(i)^{(k)} \times \left[\frac{(A_{\lambda,j})^{experiment}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \tag{7}$$

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

여기서, 아래첨자 λ, i, j 는 6개 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, 오차를 최소화하기 위하여 본 연구에서는 가변형의 수렴가중치를 사용하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 구성된 격자와 레이저빔들을 2차원으로 배열시킨 단면도이다. 2차원 배열의 레이저빔들은 가스의 흡수가 일어나는 단면 전체에 걸쳐서 배치되는데, 이 배열들의 교차점이 해석단위 셀(cell)이 된다. 가로와 세로로 11×11 총 121개의 해석격자로 구성된다. 셀 단면을 지나가는 레이저의 흡수량은 다음 식 (8)로 나타난다.

$$A_j = \sum_i n_{i,j} L_{i,j} \alpha_{i,j} \quad (8)$$

여기서, A_j 는 j 레이저빔이 지나가는 셀들의 흡수량의 합으로 나타낸다. α_{ij} 는 j 레이저가 i 셀에서의 선강도와 선평확장으로부터 구해지는 흡수계수(absorption coefficient)를 의미한다. 재구성 계산에서 적절한 초기값의 선정은 중요한 작업이다. 본 연구에서는 가로, 세로 레이저의 흡수량 데이터를 이용한 MLOS (Multiple line of sight) 기법¹¹⁾을 사용하여 초기 온도와 농도를 산정하였다. 또한, 재구성 온도와 농도를 결정하기 위한 최적화 커브피팅(curve fitting)법으로 6-Line-Profiles Fitting algorithm¹²⁾을 사용하였으며, 오차 최소화 판별 기준으로 식 (9)를 이용하여 평균제곱오차(mean square error)가 최소가 될 때까지 총 311개 구간의 파장에서 오차분석을 실시하였다.

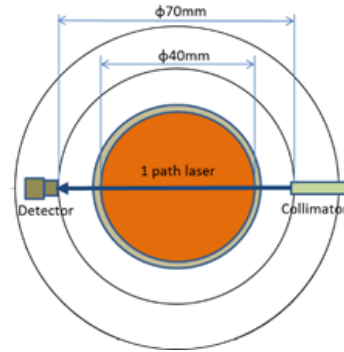
$$Error = \sum_i \sum_j \{(A_{\lambda,i,j})_{theory} - (A_{\lambda,i,j})_{experiment}\}^2 \quad (9)$$

여기서, $(A_{\lambda,i,j})_{theory}$ 는 각 셀에서 계산된 흡수량을 나타내며, $(A_{\lambda,i,j})_{experiment}$ 는 각 셀에서 레이저 실험의 흡수량을 나타낸다.

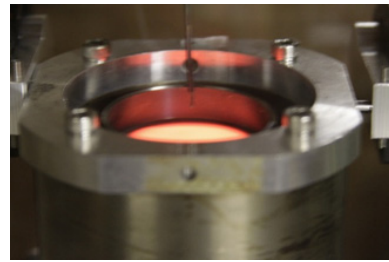
3. 선평확장함수 최적 계수 선정

3.1 균일연소기(Flat burner) 장치 및 실험

실험적으로 선평확장 계수를 산정하기 위하여 일정한 온도구배(온도변화가 없는)상태에서 선평확장 스펙트럼 신호 값을 이용하였다. 실험으로 얻은 스펙트럼은 이론적으로 계산된 스펙트럼과의 커브피팅 curve fitting)을 통하여 실험적 선평확장 계수 값을 산정하였다. Fig. 4는 플랫폼 버너 실험의 개략도와 실험사진을 보여준다. Fig. 4 (a)는 실험에 사용된 1 path 레이저빔과 셀을 보여주고 있으며, Fig. 4 (b)는



(a) Measurement cell



(b) Flat burner

Fig. 4 Schematic experiment equipment for the flat plate burner

실제 플랫폼 버너의 불꽃이 편평하게 연소되고 있음을 나타낸다. 본 연구에서는 1388 nm 영역의 H₂O 흡수 스펙트럼을 측정하기 위하여 주사범위(scanning range)가 0.6 nm인 NTT Electronics사의 DFB 반도체 레이저(NLKE5GAAA)를 사용하였고, 레이저 스캔 주파수는 1 kHz로 설정하였다. 레이저 신호는 Hamamatsu Photonics사(G8370-01)의 포토다이오드로 검출하였고, 검출된 신호는 데이터레코더(8861 Memory Highcoda HD Analog16, HIOKI)에서 500 kHz로 저장하였다. 즉, 1스캔당 500개의 데이터로 저장하였다. 또한 레이저빔이 지나가는 구간은 직경 100 μm의 열전대(KMT-100-100-120)로 온도를 측정하였다.

3.2 선평확장계수 선정

플랫폼버너(flat burner)실험을 통하여 선평확장수 최적 계수를 산정하였다. 플랫폼버너(flat burner)란, Fig. 4에

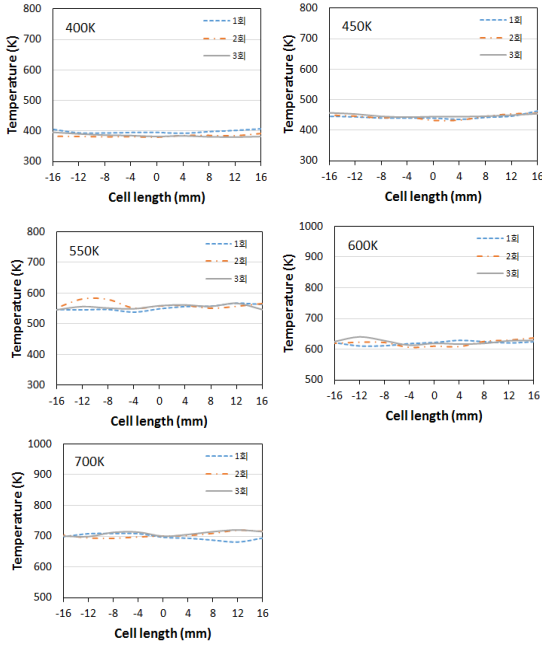


Fig. 5 Temperature profiles at different temperatures

나타낸 바와 같이, 버너의 횡단면상에서의 온도가 균일하게 연소를 하는 버너를 뜻하는데, 매번 실험 때마다 연소에 의한 단면 전체에 있어 온도는 균일하게 유지되어야 한다. Fig. 5는 설정된 400K, 450K, 550K, 600K, 700K의 다양한 온도구간에서 총 3회 동안 실시한 온도 일관성 테스트 실험결과를 보여준다. 설정 온도는 연료와 공기의 유량을 조절하며 거름망을 이용하여 안정화시켰다. X축은 버너 중심으로부터 떨어진 거리를 나타내며, Y축은 서모커플로부터 측정된 지점의 온도를 나타낸다. 총 34 mm 길이의 해석 영역에서 2 mm 단위로 이동시켜가며 17 지점에서 온도를 측정하는 결과, 각각의 온도 구배 영역에서 온도가 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 플랫폼버너의 온도에 대한 균일성을 검증한 다음, 동일한 실험 조건에서 각각의 온도 구간 별로 1 path 레이저를 이용하여 흡수스펙트럼을 재구성하는 실험을 실시하였다. 측정된 레이저 신호값에 대하여 H₂O의 1388 nm 영역대에서의 흡수스펙트럼 데이터를 보정하여 최종 흡수스펙트럼을 구하는

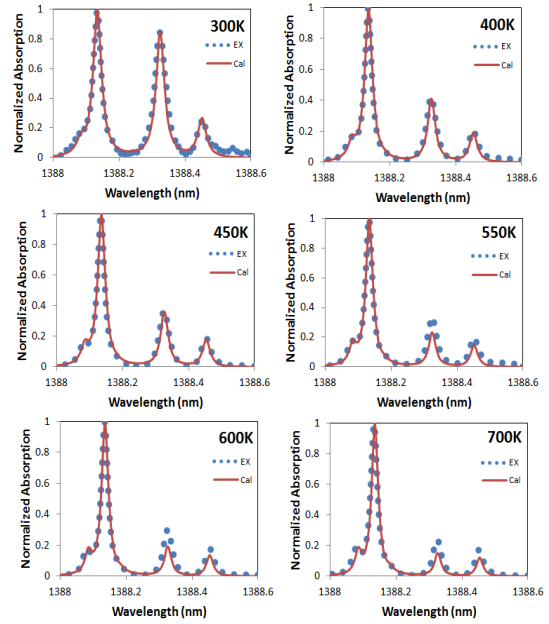


Fig. 6 Curve fitting results normalized absorption for calculative and experimental spectra

다항식 노이즈 제거법(polynomial noise reduction technique)¹³⁾을 이용하였다. Fig. 6은 실험에 의해 구한 흡수스펙트럼 그래프와 이론식에 의해 계산된 흡수스펙트럼 그래프를 각각 정규화(normalization)시켜 커브피팅(curve fitting)한 최종결과를 나타낸다. 오차 계산은 전술한 식 (9)를 사용하였으며, 평균제곱오차가 최소가 될 때, 선평확장 계수의 값을 최적화된 값으로 선정하였다. 선평확장 계수의 γ_j 와 n_j 의 값은 $0 < \gamma_j < 1$, $0 < n_j < 1$ 범위에서 각각 변화시키면서 Fig. 6과 같이 실험값과 이론값을 커브피팅(curve fitting)한 결과, γ_j 는 0.16, n_j 는 0.37에서 오차가 최소로 되었다. 따라서 본 연구에서는 이 값을 최적화 선평확장 계수로 선정하였다.

4. 엔진 실험 및 해석 결과

앞에서 구한 실험적 선평확장 계수와 이론적 선평확장 계수를 실제 엔진의 배기가스의 온도장과 농도

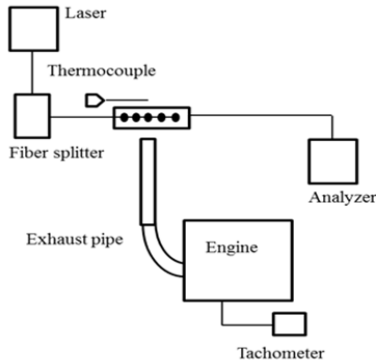


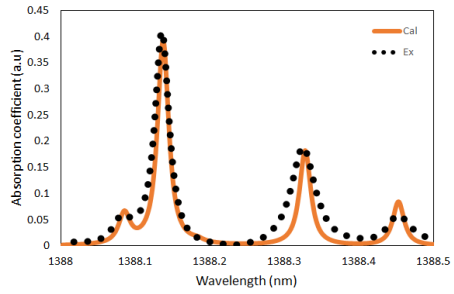
Fig. 7 Engine experimental system

장 계산에 적용하였다. Fig. 7은 엔진실험 장치도를 나타낸다.

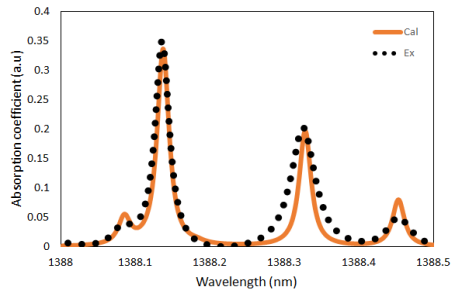
OHC (over head camshaft) 가솔린 엔진(FUJI HEAVY INDUSTRIES, Inc., EX13)을 사용하여 공회전 모드로 구동시켰으며, 배기가스 배출구의 직경은 22 mm, 길이는 160 mm이다. 엔진구동 후 6초에서 획득된 흡수스펙트럼을 이용하여 온도장과 농도장을 계산하였다. 검정을 위하여 배기가스의 중심부 온도를 열전대 (thermocouples)를 이용하여 측정하였는데, 약 450 K 이었다.

Fig. 8은 상기 엔진실험에 대하여 이론적 선평확장 계수²⁾를 사용하여 구한 흡수스펙트럼 분포를 나타낸다. 실선은 식 (9)의 이론 흡수량을 나타내는 식 $(A_{\lambda_i,j})_{theory}$ 를 나타내고, 점선은 실험으로부터 구한 흡수량을 나타내는 $(A_{\lambda_i,j})_{experiment}$ 를 나타낸다. Fig. 8 (a)는 셀의 중심부 (6, 6)인 고온부 영역에서의 커브 피팅 결과이며, 평균제곱오차는 1.12였다. Fig. 8 (b)는 셀의 경계면 (6, 1)인 저온부 영역에서의 커브 피팅 결과를 나타내는데, 1388.326nm부근에서 오차가 큼을 알 수 있다.

Fig. 9는 상기 엔진실험에 대하여 전술의 최적으로 선정된 실험적 선평확장계수($\gamma_j=0.16$, $n_j=0.37$)를 사용하여 구한 흡수스펙트럼 분포를 나타낸다. 실선과 점선은 각각 이론 흡수량과 실험 흡수량을 나타낸다. Fig. 9 (a)와 (b)는 각각 셀의 중심부 (6, 6)인

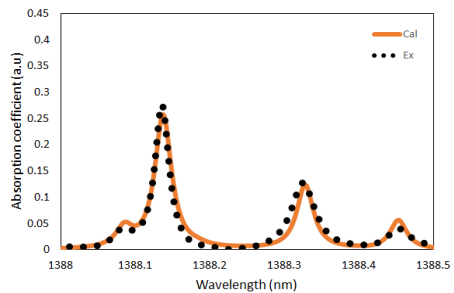


(a) High temperature region

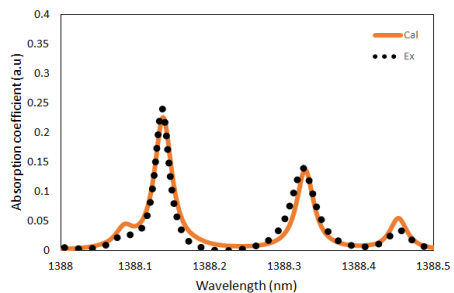


(b) Low temperature region

Fig. 8 Fitted absorption coefficients by using theoretical broadening coefficients



(a) High temperature region



(b) Low temperature region

Fig. 9 Fitted absorption coefficients by using experimental broadening coefficients

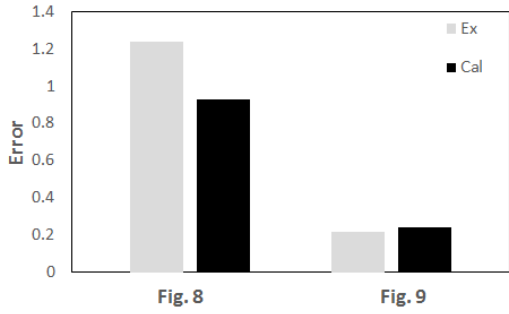


Fig. 10 Error comparison between the theoretical and the experimental broadening coefficients

고온부 영역과 셀의 경계면 (6, 1)인 저온부 영역에서의 스펙트럼분포를 나타낸다.

Fig. 10은 Fig. 8과 Fig. 9의 결과로부터 알 수 있었던, 이론적 선평확장계수에 의하여 구한 흡수스펙트럼 분포와 실험적 선평확장계수에 의한 흡수스펙트럼 분포에 의한 흡수계수 오차를 나타낸다. 이론 선평확장계수를 사용했을 때보다 실험적 선평확장계수를 사용하였을 때가 흡수계수 오차가 1/5정도로

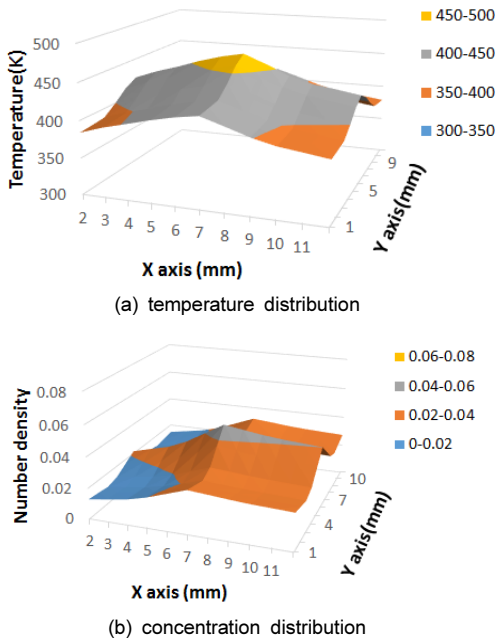


Fig. 11 Reconstructed temperature and concentration fields using theoretical broadening coefficients

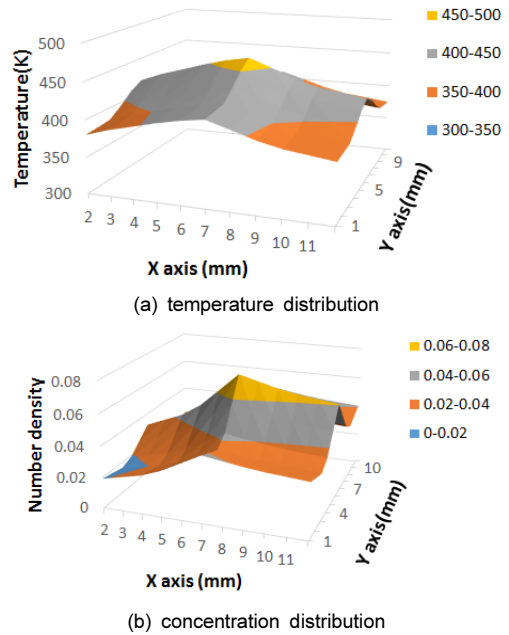


Fig. 12 Reconstructed temperature and concentration fields using experimental broadening coefficients

줄어듦을 알 수 있다.

Fig. 11은 이론 선평확장계수를 사용하여 계산된 온도장과 농도장에 대한 계산 결과이고, Fig. 12는 실험적 선평확장계수를 사용하여 계산된 온도장과 농도장에 대한 결과를 나타낸다. 이론 선평확장계수와 실험적 선평확장계수를 사용한 중심부에서 재구성된 온도는 각각 467 K, 462 K으로 비슷한 결과를 보였다. 이는 전술한 열전대 측정결과인 중심부 온도 450 K에 근접한 온도 값임을 알 수 있다. 그러나 중심부의 농도는 각각 0.0473, 0.0731로 큰 차이를 보였다. Fig. 10에서의 결과에서 알 수 있듯이 실험적 선평확장계수를 사용하였을 때가 커브피팅의 오차가 적었는데, 이는 실험적 선평확장계수 사용은 흡수스펙트럼 분포에 대한 커브피팅 오차를 적게 함을 시사한다. 커브피팅 오차가 적다는 것은 CT-TDLAS 계산 원리상 온도장 농도장 계산에 오차가 적게 됨을 의미한다.

4. 결 론

연소장에서 발생하는 수증기(H₂O)의 특정파장대(1388nm 파장 영역)의 흡수스펙트럼 특성을 이용한, CT-TDLAS기반 가스의 온도장 및 농도장 측정성능 향상을 위해, 실험을 통한 최적의 선평확장계수를 산정하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

플랫버너(flat burner) 실험을 통하여 가스분자 간 충돌(collision)에 의한 최적 선평확장계수는 $\gamma_1=0.16$, $\eta_1=0.37$ 임을 확인하였다. 실험적 선평확장계수를 이용한 온도장 농도장 계산 성능평가를 위하여 엔진 배기가스의 온도와 농도장 측정에 적용한 결과, 흡수스펙트럼의 커브피팅의 오차가 실험적 선평확장 계수를 사용했을 때 줄어듦을 확인할 수 있었다. 계산을 통하여 재구성된 온도장은 이론 및 실험적 선평확장계수를 사용한 모두에서 저온부 영역에서는 좋은 성능을 보였으나 700K 이상의 고온부에서는 재구성 계산의 한계를 보였고, 재구성된 농도장의 성능은 실험적 선평확장 계수를 사용했을 때가 이론 선평확장 계수를 사용했을 때보다 개선된 결과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견핵심과제(No.2015R1A2A2A01006803)와 지역혁신창의인력양성사업(No. 2015H1C1A1035890)의 일환으로 수행되었음. 일부는 중소중견기업지원사업 WC300 R&D(S2415805) 프로그램의 지원에 의한. 또한, 본 논문은 2016년도 포항대학교 연구년 지원에 의한 연구결과임.

References

1. D. W. Choi, G. R. Cho, J. H. Shim, Y. Deguchi, D. H. Kim, D. H. Doh, 2D Temperature Measurement of CT-TDLAS by using Two-Ratios-of-

- Three-Peaks Algorithm, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 3, 2016, pp. 318-327.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
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. G. Durry, V. Zeninari, B. Parvitte, T. Le barbu, F. Lefevre, J. Ovarlez, R. R. Gamache, "Pressure-broadening coefficients and line strengths of H₂O near 1.39 mm: application to the in situ sensing of the middle atmosphere with balloonborne diode lasers", Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 94(3-4), 2004, pp. 387-403.
9. R. R. Gamache, S. Kennedy, R. Hawkins, L. S.

- Rothman, Journal of Molecular Structure 517-518 2000, pp. 407-425.
10. 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.
 11. 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.
 12. D. W. Choi, "Study on performance enhancements of temperature and concentration fields measurements based on CT-TDLAS", Ph.D. dissertation, Korea Maritime & Ocean Univ.
 13. Y. Zatar, J. Bechara, A. Khoury, D Zaouk, J.P. Charles, Diode laser sensor for process control and environmental monitoring, Applied Energy, 65, pp. 107-113, 2000.