



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

CT-TDLAS를 이용한 연소장에서의
3차원 온도·농도 분포 측정에 관한 연구

Measurement of 3-Dimensional Temperature and
Concentration Distributions for Combustion field
by Using CT-TDLAS



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과

윤 동 익

본 논문을 윤동익의 공학석사 학위논문으로 인준함



위원장 : 최재혁 (인)

위원 : 황광일 (인)

위원 : 도덕희 (인)

2017 년 12 월 26 일

한국해양대학교 일반대학원

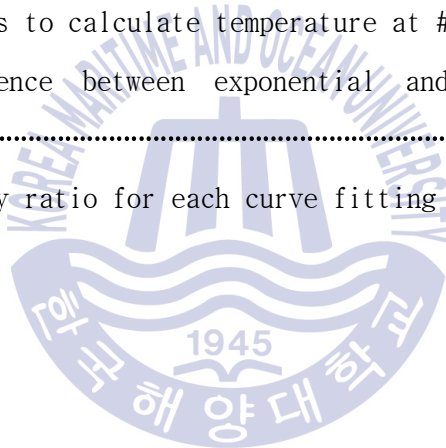
목 차

List of Table	I
List of Figures	II
Nomenclature	VI
Abstract	VII
제1장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구의 구성	3
제2장 CT-TDLAS 이론	4
2.1 Lambert-Beer' s Law	4
2.2 선강도(Line Strength)	7
2.3 선폭확장 함수(Line Broadening Function)	11
2.3.1 Doppler Broadening	12
2.3.2 Collisional Broadening	14
2.3.3 Voigt 함수	16
2.4 흡수선데이터 처리	19
2.4.1 흡수선을 이용한 온도 산정	20

2.4.2 Exponential curve fitting	24
2.4.3 Weighted curve fitting	29
2.5 Computed-Tomography Reconstruction	31
2.5.1 MART Method	33
2.5.2 SMART Method	35
2.5.3 MART & SMART 비교평가	36
제3장 TDLAS 구축 및 실험결과	39
3.1 TDLAS 실험장치 및 실험방법	39
3.2 TDLAS 온도장·농도장 재구성결과	43
제4장 CT-TDLAS 성능평가	53
4.1 Thermocouple 온도측정 비교	53
4.2 성능평가	58
제5장 결론 및 고찰	68
참고문헌	70

List of Tables

Table 2.1 Coefficients of the polynomial expression for the partition of H ₂ O	10
Table 2.2 HITRAN2008 absorption database	22
Table 2.3 Variables to calculate temperature at #1 ~ #6	23
Table 2.4 Difference between exponential and polynomial curve fitting at #1 & #2	27
Table 2.5 Intensity ratio for each curve fitting	28



List of Figures

Figure 2.1 Schematic diagram of Lambert-Beer' s law	6
Figure 2.2 Boltzmann distribution for different temperature condition	10
Figure 2.3 FWHW(Full Width at Half Maximum) of gaussian lineshape function	13
Figure 2.4 Absorption Line	19
Figure 2.5 H ₂ O absorption spectrum of two temperature(500K, 1000K, 1100K) at 1388nm ~ 1388.6nm	21
Figure 2.6 Temperature dependence of six lines	21
Figure 2.7 Absorption spectrum using polynomial equation	26
Figure 2.8 Absorption spectrum using exponential equation	26
Figure 2.9 Absorption spectrum before applying coefficient of weight	30
Figure 2.10 Absorption spectrum after applying coefficient of weight	30
Figure 2.11 Analysis grid and laser beam path	32
Figure 2.12 Flow chart of pattern matching algorithm	34

Figure 2.13 Distribution of coefficient of absorption using MART method	37
Figure 2.14 Distribution of coefficient of absorption using SMART method	37
Figure 2.15 Standard deviation for MART and SMART	38
Figure 3.1 Schmatic of CT-TDLAS	41
Figure 3.2 Exporimental cell	41
Figure 3.3 Equipment of TDLAS I	42
Figure 3.4 Equipment of TDLAS II	42
Figure 3.5 Absorption spectra for laser 01-08 at room temperature (294K)	44
Figure 3.6 Absorption spectra for laser 09-16 at room temperature (294K)	45
Figure 3.7 Temperature distributions at room temperature(294K)	46
Figure 3.8 Concentration distributions at room temperature(294K)	47
Figure 3.9 Absorption spectra for laser 01-08 at high temperature (800K)	48

Figure 3.10 Absorption spectra for laser 09-16 at high temperature(800K)	49
Figure 3.11 Temperature distributions I at high temperature(800K)	50
Figure 3.12 Temperature distributions II at high temperature(800K)	51
Figure 3.13 Concentration distributions at high temperature(800K)	52
Figure 4.1 Temperature measuring points using thermocouples	54
Figure 4.2 Temperature fields measured by thermocouple for 64 points	55
Figure 4.3 Temperature fields measured by CT-TDLAS for 64 points	56
Figure 4.4 Temperature difference for each points between CT-TDLAS and thermocouple	57
Figure 4.5 Comparison points for each paths	60
Figure 4.6 Comparison of CT-TDLAS and thermocouple for 64 points at 1st Layer	61
Figure 4.7 Comparison of CT-TDLAS and thermocouple for 64 points at 2nd Layer	63

Figure 4.8 Errors rate[%] for each points at 1st & 2nd Layers 65

Figure 4.9 Normalization graphs for 1st layer 66

Figure 4.10 Normalization graphs for 2nd layer 67



사용 기호

Nomenclature

I_t	Incident light intensity
I_0	Transmitted light intensity
a_λ	Absorbance
n_i	Number of density of species 'i'
P	Pressure
L	Length of light path
$S_{i,j}$	Temperature dependent absorption line strength of the absorption line 'j'
$G_{\nu_i,j}$	Light line broadening function of line shape function
E''	Lower state energy level
$Q(T)$	Partition function
h	Plank's constant($h=6.6256 \cdot 10^{-27}$ [erg · s])
k	Boltzmann's constant($6.6256 \cdot 10^{-27}$ [erg/K])
c	Light speed($3.0 \cdot 10^{10}$ [cm/s])
ν_0	Wavenumber
A	The amount of absorption
β	Relaxation parameter
T	Temperature [K]

Measurement of 3-Dimensional Temperature and Concentration Distributions for Combustion field by Using CT-TDLAS

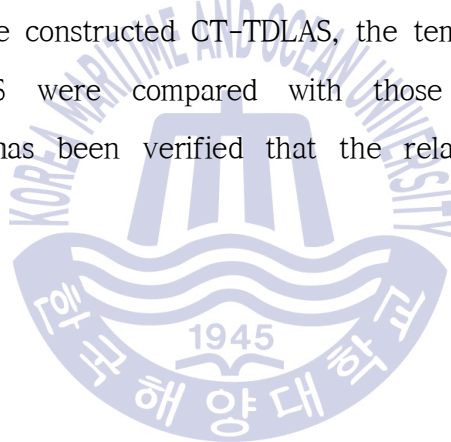
by Dong Ik Yoon

*Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University*

Abstract

This paper is aimed at 3-dimensional measurements of temperature and concentration with multi-layers for CT-TDLAS(Computed Tomography Tunable Diode Laser Spectroscopy). The calculation results with the measurement system for the distributions of temperature and concentration of the exhaust gas field showed clear differences of temperature and concentration fields at each layer. In this paper, the H₂O vapor was considered as target gas for measurements, and the

wavelength range of the diode laser was set at 1388.0 ~ 1388.6nm where the absorption occurs. Double layers were installed with height difference of 15mm, and 16 lines (8×8 path) were constructed at each layer. Additionally, new curve fitting method(exponential and weighted curve fitting) and reconstruction algorithm(SMART method) was adopted to enhance the performances of CT-TDLAS. To estimate the performances of the constructed CT-TDLAS, the temperatures calculated by the CT-TDLAS were compared with those measured by the thermocouples. It has been verified that the relative error range is 0~33%.



CT-TDLAS를 이용한 연소장에서의 3차원 온도·농도 분포 측정에 관한 연구

윤 동 익

한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과

초록

본 논문은 CT-TDLAS를 이용한 연소장에서의 온도·농도분포 측정법 개발에 관한 내용을 담고 있다. 기존 CT-TDLAS는 2차원 평면의 온도·농도분포 산정만 가능하였지만 본 논문에서는 측정셀을 2개 적층하여 3차원 공간에서의 온도 및 농도분포 측정결과를 얻어내었다. 측정가스의 대상은 H₂O로 선정하였고 사용된 레이저 파장대는 1388.0 ~ 1388.6nm이다. 총 16개의 레이저빔(8x8path)이 각 층마다 사용되어 총 32개의 레이저빔을 공간상에 형성하였다. 커브피팅(curve fitting) 함수로서 지수함수를 사용하였다. 또한 선행연구에서 사용된 CT의 재구성 알고리즘은 MART법이였으나, 본 연구에서는 MART법과 SMART법에 의한 결과를 비교하였고 SMART법의 성능이 우수한 것을 확인하였다. SMART법에 의하여 얻어진 결과를

Thermocouple의 측정값과 비교함으로써 CT-TDLAS의 온도측정 성능을 평가하였다. 그 결과 온도측정 범위 내에서 오차율은 최소 0%에서 최대 33%의 오차를 가졌다.



제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

유엔기후협약인 교토의정서의 공식효력이 발하면서, 2013년 1월 1일부터 건조되는 선박은 국제해양오염방지협약에 따라 선급으로부터 에너지효율증서(IEE, International Energy Efficiency)를 발급받아 소지해야만 항해가 가능한 상황이다. 또한 국제해사기구(IMO)가 오염 물질의 배출을 줄이기 위해 매년 규제가 강화되고 있고 앞으로 더 강화 될 전망이다.

이러한 배경으로부터 배기가스를 정확히 측정하는 방법에 대한 중요성이 증대되고 있으며, 최근 비접촉식으로 라만효과를 이용한 라만산란법(Spontaneous Raman Spectroscopy, CARS: Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy)(Ax et al.; 2010, Braeuer and Leipertz; 2009, Jehlickan et al.; 2009), 레이저유도형광법(LIF: Laser-Induced Fluorescence) (Engel et al.; 2009), 레이저유도플라즈마분광법 LIBS(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)법 (Hou et al.; 2014) 등의 레이저응용 계측기술의 개발이 수행되었다. 하지만 이러한 기술들은 온도나 압력에 따라 빛의 강도가 변하게 되면 측정이 불가하게 된다. 또한, 특정한 가스 성분에 대한 농도측정은 가능하지만 복수 성분을 포함하는 가스는 측정 할 수 없다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 Deguchi 등(2012)은 2차원 온도와 농도 분포 측정이 가능한 CT-TDLAS법(Computed Tomography - Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)을 개발하였다. CT-TDLAS는 가스가 특정

과장대에서 온도와 농도에 따라 흡수강도(Absorption Intensity)가 달라지는 특성을 이용하여 온도분포와 농도분포를 산정한다. 현재까지 진행된 연구는 2차원 온도분포와 농도분포 산정이며 2차원 평면에 대한 결과는 연소상태에 대한 정확한 해석에 한계를 갖고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 CT-TDLAS를 이용하여 3차원 온도분포와 농도분포를 선정하고, 온도측정에서 가장 많이 사용되는 계측기인 Thermocouple을 이용해 온도분포결과 값을 비교하여 CT-TDLAS의 신뢰성을 검증한다. 이렇게 얻어진 데이터를 기반으로 연소 시 3차원 온도분포를 산출하는데 목적을 삼고 있다.



1.2 연구의 구성

본 연구는 CT-TDLAS법을 이용한 고온가스의 2차원 온도분포 및 농도 분포를 측정된 선행연구내용을 바탕으로 연소장에서의 3차원 온도분포와 농도분포를 산정하는 방법에 대한 내용을 다루고 있다. 이를 달성하기 위한 연구 진행의 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적에 대하여 소개하고, 제2장에서는 CT-TDLAS를 이용한 온도분포 및 농도분포 측정 이론에 대하여 기술한다. 제3장에서는 CT-TDLAS 실험장비의 구성 및 실험과정과 실험결과를 기술한다. 제4장에서는 CT-TDLAS를 통하여 측정된 온도분포 측정 결과와 Thermocouple을 이용한 온도분포 측정 결과를 비교하고 CT-TDLAS에서 얻어진 계산결과에 대한 성능평가를 기술한다. 마지막으로 제5장에서는 실험결과에 대한 분석을 정리한다.

제2장 CT-TDLAS에 의한 온도장 농도장 계산 이론

2.1 Lambert-Beer' s Law

TDLAS는 Fig 2.1과 같이 가스매질에 빛이 통과할 때 입사광과 투사광 강도 비는 매질의 두께, 매질 농도, 매질의 흡수계수에 비례한다는 Lambert-Beer법칙에 기반한 측정법이다.(The Beer-Lambert Law) (D.F.Swinehart; 1962) Lambert-Beer 법칙은 식 (2.1)과 같이 온도와 농도, 흡수계수의 함수로 나타낼 수 있으며 측정된 n 은 투과광 $I_t(\lambda)$ 와 관련이 있으며, 가스원자의 농도에 따라 흡수되는 빛은 지수함수적으로 감소하는 것을 이용한다. 또한, 흡수계수는 흡수선강도와 Voigt의 lineshape 형상함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{I_t(\lambda)}{I_0(\lambda)} &= \exp\left\{-\sum_i(n_i L \alpha_{i,\lambda})\right\} \\ &= \exp\left\{-\sum_i(n_i \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) G_{V_{i,j}})\right\} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$I_o(\lambda)$: Incident light intensity

$I_t(\lambda)$: Transmitted light intensity

α_λ : Absorbance

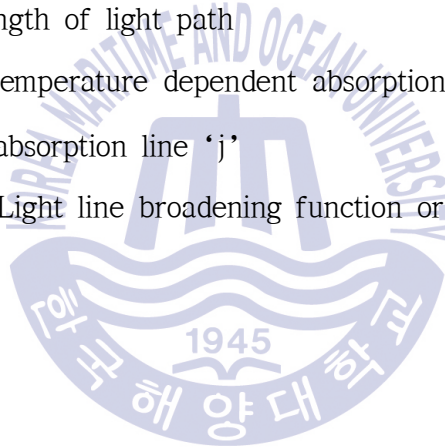
n_i : Number of density of species 'i'

P : Pressure

L : Length of light path

$S_{i,j}$: Temperature dependent absorption line strength of the
absorption line 'j'

$G_{\nu_i,j}$: Light line broadening function or line shape function



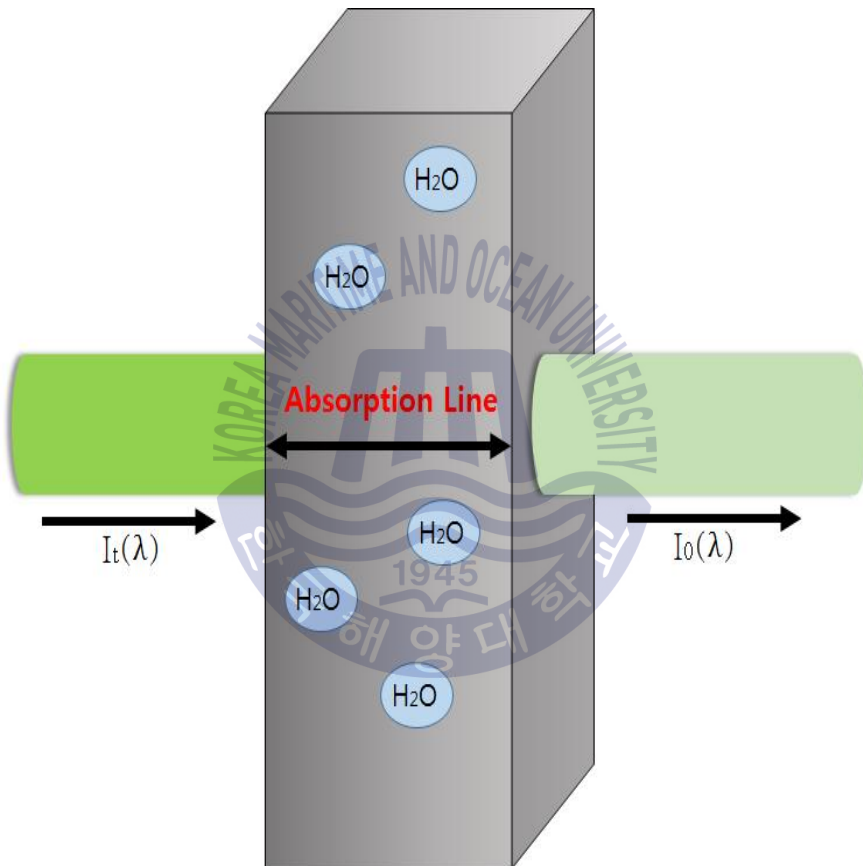


Fig.2.1 Schematic diagram of Lambert-Beer's law

2.2 선강도(Line-Strength)

선 강도는 온도함수로 단위는 압력에 종속되는 $S[cm^{-2}atm^{-1}]$ 와 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge MA, USA에서 제공하는 각 분자별 파장에 대한 HITRAN(High resolution Transmission)에 의해 산출되는 개수밀도 단위인 $S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}]$ 로 나타낸다. 식 (2.2)은 선강도 식으로써 n 은 개수밀도(Number Density)[*molecules/cc*], P 는 압력[atm]이다.(The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database)(L.S. Rothman et al; 2009)

$$S[cm^{-2}atm^{-1}] = \frac{S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}] \times n[molecules/cc]}{P[atm]} \quad (2.2)$$

부피개수밀도 n 은 식(2.3)을 따르고, 식 (2.4)와 같이 이상기체방정식을 식 (2.2)에 대입하면 식 (2.4)과 같은 식을 도출 해낼 수 있다.

$$n = \frac{N}{V} \quad (2.3)$$

$$PV = NkT \quad (2.4)$$

$$S[atm^{-2}atm^{-1}] = \frac{S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}] \times 1013250[dynes/(cm^2 \cdot atm)]}{kT} \quad (2.5)$$

여기서, k 는 볼츠만 상수(Boltzmann Constant)를 나타내고 $T[K]$ 는 측정대 상가스의 온도이다. 식 (2.5)에서 볼츠만 상수를 대입하여 정리하면 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있고, T 를 표준온도(296K)라 가정하면 식 (2.7)과 같이 최종의 선 강도식을 얻을 수 있다.

$$S = \frac{S^* \times (7.34 \times 10^{21})}{T} [cm^{-2} atm^{-1}] \quad (2.6)$$

$$S = S^* \times (2.488 \times 10^{19}) [cm^{-2} atm^{-1}] \quad (2.7)$$

가스분자가 빛 에너지를 흡수하는 상태에서의 선강도는 볼츠만 분포를 따르며 Fig 2.2와 같이 볼츠만 분포는 온도에 따라 좌우되므로 선강도는 온도의 함수라 말할 수 있다.

온도 T 에서 특정 천이영역 ν 에 대한 선 강도 $S_\nu(T)$ 는 분자의 표준 온도($T_0 = 296K$)에서의 선 강도 $S_\nu(T_0)$, 빛 에너지를 흡수하는 분자의 부분 함수(Q), 천이 주파수(ν_0), 천이의 저 준위 에너지(E'')에 의해 결정되며 관계식은 아래 (2.8)을 따른다.

$$S_v(T) = S_v(T_0) \frac{T}{T_0} \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp \left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left[\frac{1 - \exp\left(\frac{-hcV_{0,v}}{kT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-hcV_{0,v}}{kT_0}\right)} \right] \quad (2.8)$$

여기서, h 는 플랑크 상수(Plank's Constant, $6.6256 \cdot 10^{-27}$ [erg · s]), k 는 볼츠만 상수(Boltzmann's Constant, $k=1.38054 \cdot 10^{-16}$ [erg/K]), c 는 빛의 속도 (Light Speed, $3.0 \cdot 10^{10}$ [cm/s]), v_0 [cm^{-1}]는 파수(Wavenumber), E'' [cm^{-1}]는 저준위 에너지(Lower-state energy level)를 나타내고, $Q(T)$ 는 분배함수(Partition function)이다. 분자에너지상태량에 관계하는 온도의 함수는 식(2.9)로 정의되고 3차함수로 표현된다.

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (2.9)$$

각 계수 a,b,c,d는 Table 2.1로부터 확인 할 수 있으며 온도구간에 따라 달라진다.

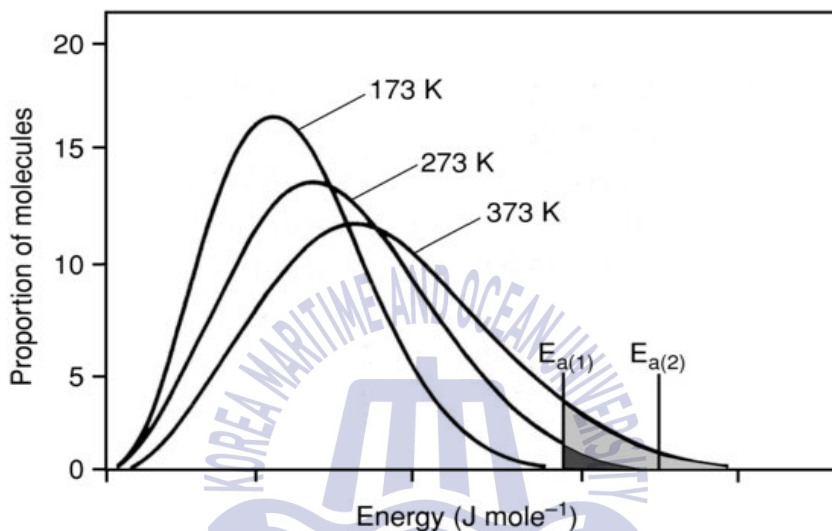


Fig.2.2 Boltzmann distribution for different temperature condition

Table 2.1 Coefficients of the polynomial expression for the partition of H₂O

coefficients	70<T<500K	500<T<1500K	1500<T<3005K
a	-0.44405×10^1	-0.94327×10^2	-0.11727×10^4
b	0.27678×10^0	0.81903×10^0	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}

2.3 선폭확장 함수(Line Broadening Function)

레이저빔에 의해 가스분자의 흡수가 일어날 때 선폭확장은 선형함수 (Line shape function)의 형태로 나타나며, 분자들의 균일한 선폭확장 (Homogeneous broadening)과 분자들의 불균일한 선폭확장(Inhomogeneous broadening)으로 분류된다. 또한 천이는 복합적 선형함수(Multiple lineshape function)으로 전환된다.(Tables of the Line Broadening Function $H(a, \nu)$)(G.D. Finn et al; 1965)

선형함수는 압력, 온도에 의한 함수로서 압력과 온도에 따라 흡수신호의 세기 및 선폭확장이 일어나는데, 이러한 변화들은 가스의 농도계측에 오차를 발생 시킬 수 있다. 그러므로 정확한 농도계측을 위해서는 선형함수의 선폭확장 해석이 중요하다. 선형함수식은 분광학적 흡수계수에 대한 상대적 변화를 반영하는것으로써, 주파수에 대한 선형함수의 적분된 값을 1로 표준화시키면 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 도플러 선폭확장(Doppler Broadening)과 분자간 충돌에 의한 선폭확장(Collisional Broadening)의 영향을 모두 고려하여 절충된 모델인 Voigt 선형함수를 이용한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} G dv = 1 \quad (2.10)$$

2.3.1 Doppler Broadening

도플러 선폭확장은 불균일한 선폭확장을 나타내는데, 가스 분자 그룹에 따라 다양한 속도분포를 가지므로 도플러 효과에 의하여 흡수선이 일정하게 퍼지는 현상을 갖게 된다. 이러한 선폭 확장은 가스 분자간 열운동(Thermal motion)에 의해 발생되며, 고온의 가스일수록 열적 도플러 확장(Thermal Doppler Broadening)은 더욱 크게 나타난다. 즉, 분자의 열운동에 의해 발생하는 분자 속도에 따른 도플러 선형함수는 Fig. 2.3과 같은 전형적인 가우시안분포(Gaussian Distribution)의 함수 그래프로 나타난다.

온도와 흡수선의 중심 진동수의 함수인 도플러 선폭(Doppler Width)의 식은 (2.11)과 같이 나타낼 수 있으며 도플러 반폭은 식 (2.12)로부터 구할 수 있다. $V_0 [cm^{-1}]$ 은 중심주파수(Linecenter frequency) 이며 $T[K]$ 는 온도, 그리고 $M[a.m.u]$ 은 흡수하는 가스 분자의 분자량(Molecular Weight)을 나타낸다.(Doppler Broadening in Beam Experiments)(P.J. Chantry et al 1971)

$$G_D(V) = \frac{2}{\Delta V_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp - 4 \ln 2 \left(\frac{V - V_0}{\Delta V_D} \right)^2 \quad (2.11)$$

$$\Delta V_D = V_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}} = 7.1623 \times 10^{-7} V_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2.12)$$

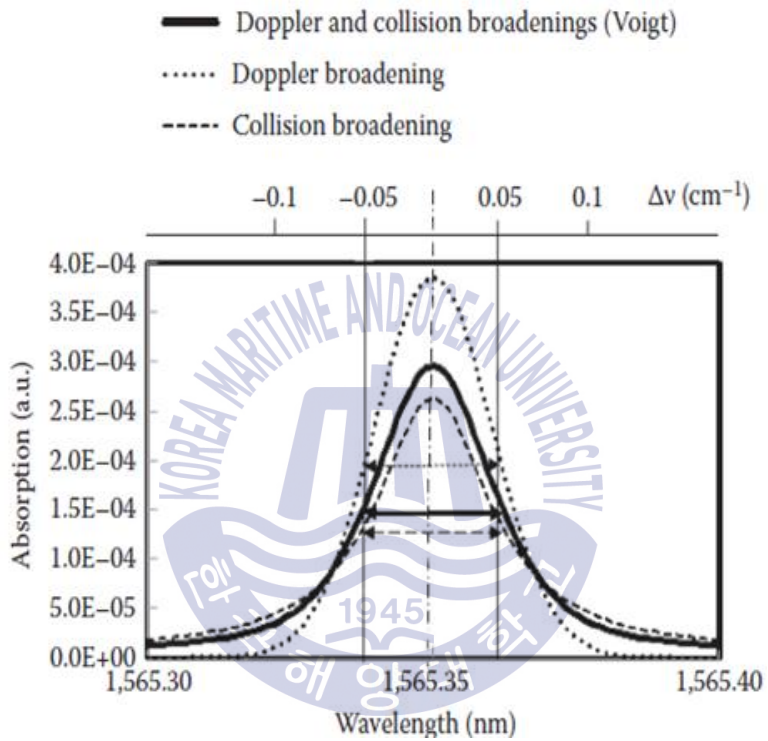


Fig.2.3 FWHW(Full Width at Half Maximum) of gaussian lineshape function.

2.3.2 Collisional Broadening

Collisional Broadening은 가스분자간의 상호 충돌에 의해 발생되며, Heigenberg 불확정성 원리에 의해 설명된다. 가스 분자간 충돌발생 횟수가 많을수록 회전 및 진동에너지 준위의 변위를 유도하며, 이는 균일한 선폭 넓어짐과 선폭의 증가를 보인다. 이러한 선폭변화는 식(2.13)의 Lorentzian 선형함수로 표현되어진다.

$$\Delta V \geq \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.13)$$

광자(Photon) 에너지가 흥분된 상태에서는 제한된 시간으로 인해 정확히 알 수 없다. 하지만 흡수 천이(Absorption Transition)의 에너지 상태가 자연적인 수명에 의해 감소된다면, 자연적 선폭 확장은 Lorentzian 선형 함수로 표현이 가능하며 식(2.14)와 같다.

$$G_n(V) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta V_n}{2}}{(V - V_0)^2 + \left(\frac{\Delta V_n}{2}\right)^2} \quad (2.14)$$

여기서, $\Delta V_c [cm^{-1}]$ 는 collisional 선폭(FWHM) 그리고 $V_0 [cm^{-1}]$ 는 중심 주파수(Linecenter Frequency)이다. 이러한 자연적 선폭 확장은 대부분의 경우 비교적 긴 에너지 준위의 수명으로 인해 무시 할 수 있다.

또한, 다양한 가스가 존재하는 환경에서 충돌 반폭(Collision Half-width)는 식 (2.15)와 같으며 이를 온도함수로 나타내면 식 (2.16)과 같다. (Collisional broadening of rotation-vibration lines for asymmetric top molecules. I. Theoretical model for both distant and close collisions)(B. Labani, et al; 1986)

$$\Delta V_c = P \sum_j (X_j 2\gamma_j) \quad (2.15)$$

$$\gamma_j(T) = \gamma_j(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_j} \quad (2.16)$$

X_j 는 j종 가스의 몰 분율(Mole fraction)을 나타내며, $\gamma_j [cm^{-1}atm^{-1}]$ 는 충돌 선폭 확장 계수(Coefficient of Collisional Broadening), T_0 는 기준 온도, n_j 는 온도 의존 계수(Coefficient of Temperature Dependence)이다. 중심 주파수에서의 Lorentzian 선형 함수식(2.17)과 같다.

$$G_C(V_0) = \frac{2}{\pi \Delta V_c} \quad (2.17)$$

2.3.3 Voigt 함수

위에서 언급한 Doppler Broadening은 낮은 압력 범위에서 큰 영향을 주고, Collisional Broadening은 높은 압력 범위에서 큰 영향을 주게 된다. 하지만 분자들의 흡수에 의해 발생하는 흡수신호의 선폭 확장은 자연적 선폭 확장, 도플러 선폭 확장, 분자 충돌에 의한 선폭 확장이 복합적으로 발생된다. 그러므로 위 세 가지를 절충하는 선형함수 모델이 필요하며, Gaussian 선형함수와 Collisional 선형함수를 절충한 함수모델 Voigt Profile은 이를 만족한다. Voigt Profile은 식 (2.18)과 같이 나타낼 수 있으며, 중심주파수 ν_0 에서의 관계식은 식 (2.19)와 같이 나타낼 수 있다.(Use of the Voigt function in a single-line method for the analysis of X-ray diffraction line broadening)(Th .H. de Keijser et al; 1982)

$$G_V(V) = \int_{-\infty}^{\infty} G_D(u)G_C(V-u)du \quad (2.18)$$

$$G_V(V) = G_D \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-y^2)dy}{a^2 + (x-y)^2} = G_D(V_0) V(a,x) \quad (2.19)$$

Voigt 변수 a 는 Doppler Broadening과 Collisional Broadening에 의해 발생하는 선폭 확장의 상대적 영향도를 나타내며, 충돌에 의한 선폭확장의 효과가 증가할 때, a 또한 증가하게 되며 식 (2.20)과 같이 나타낼 수 있

다. 변수 x 는 흡수선의 중심으로부터 무차원수의 거리이며, 식 (2.21)과 같이 나타내어진다.

$$a = \frac{\sqrt{\ln 2} \Delta V_C}{\Delta V_D} \quad (2.20)$$

$$x = \frac{2\sqrt{\ln 2}(V - V_0)}{\Delta V_D} \quad (2.21)$$

Voigt 선형함수는 흡수 분광학에서 대부분 정량화를 위한 이론으로 사용하였으나 실제 계측 시 정량화에 사용되는 Voigt함수를 적용하기에 유용하지 않다. 그래서 실제 계측 시 적용되는 Voigt함수는 다른 수치적 근사법을 적용하여 도출된 Voigt함수를 사용한다. Voigt선형 함수의 선폭 Whiting방법을 이용한 선폭(FWHM)은 식(2.22)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_V = \frac{\Delta V_C}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta V_C^2}{4} + \Delta V_D^2\right)} \quad (2.22)$$

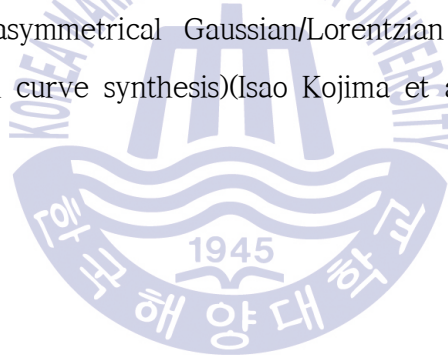
Vogit선형 함수의 최고 높이(Peak Height)는 중심주파수로부터 알 수 있으며 식(2.23)로 나타낼 수 있고 관계식은 (2.24), (2.25)와 같다.

$$G_V(V_0) = \left[\left(\frac{\beta}{V_{ED} \sqrt{\pi}} \right) + \left(\frac{1-\beta}{\pi \cdot \Delta V_C} \right) \right] \quad (2.23)$$

$$\beta = \left(\frac{V_{ED}}{(\Delta V_C + V_{ED})} \right) \quad (2.24)$$

$$V_{ED} = \frac{\Delta V_D}{\sqrt{\ln 2}} \quad (2.25)$$

ΔV_D 와 ΔV_C 는 각각 Gaussian과 Lorentzian 함수의 HWHM(Half-Width at Half Maximum)선폭이다. 본 연구에서는 온도에 의한 선폭 확장, 압력에 의한 선폭 확장을 모두 고려한 Voigt 선형 함수를 이용한다.(Application of asymmetrical Gaussian/Lorentzian mixed function for X-ray photoelectron curve synthesis)(Isao Kojima et al; 1987)



2.4 흡수선데이터 처리

Fig 2.4은 CT-TDLAS를 통하여 측정된 흡수선 형상이다. 발진된 레이저는 매질 통과 시 특정파장에서 흡수 되고, 이로 인해 해당 파장 영역대에서 계측되는 Voltage값이 줄어든다. 이 흡수선 그래프에 Curve fitting을 하여 흡수 스펙트럼을 구하고 흡수가 일어난 파장대에서의 온도에 따라 변화는 흡수비를 이용하여 온도를 구하게 된다.

본 절에서는 Fig 2.4의 흡수선 데이터에 Curve fitting 적용하여 흡수스펙트럼을 얻는 과정과 흡수스펙트럼을 이용하여 온도를 산정하는 방법에 대해 서술한다.

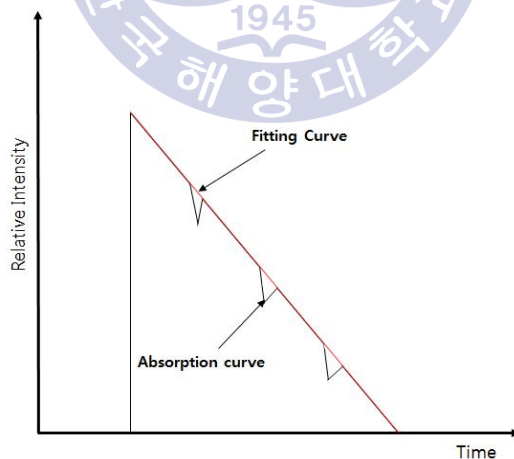


Fig. 2.4 Absorption data

2.4.1 흡수선을 이용한 온도산정

선강도는 식(2.8)에서 보는바와 같이 온도의 함수이며, Table 2.2의 HITRAN2008 Database을 통하여 H₂O 스펙트럼의 흡수강도를 알아 낼 수 있다. 하지만 실험 진행시 고온부에서 CT-TDLAS의 측정결과와 Thermo-couple로 측정한 불꽃의 온도가 서로 일치하지 않아 Air-Broadening과 Temperature-dependence coefficient값을 고온부에서는 변경하였으며 그 값은 Table 2.3에서 확인 할 수 있다. 즉, 해석진행시 저온부에서는 HITRAN Data를 이용하여 계산하고, 고온부에서는 수정된 값을 이용하는 Hybrid 방식을 채택하였다. Fig 2.5는 900K, 1000K, 1300K에서의 H₂O 흡수 스펙트럼을 나타낸다. 온도 변화에 따라 각 파장에서 흡수값이 변하는 것을 확인 할 수 있고 각각의 피크 점에서의 파장을 대표파장으로 선정 할 수 있다. 여섯 피크 파장은 1388.085nm, 1388.135nm, 1388.136nm, 1388.183nm, 1388.326nm, 1388.454nm이고 본 연구에서는 이를 각각 #1, #2, #3, #4, #5, #6으로 표현한다. Fig 2.6은 각 흡수파장 #1, #2, #3, #4, #5, #6에서 온도에 따른 선 강도를 나타낸다. 이와 같은 데이터들을 이용하여 온도를 산정하며 다음 절에서는 여섯 파장의 흡수스펙트럼을 산출하기 위한 fitting 알고리즘에 관한 내용을 기술한다.

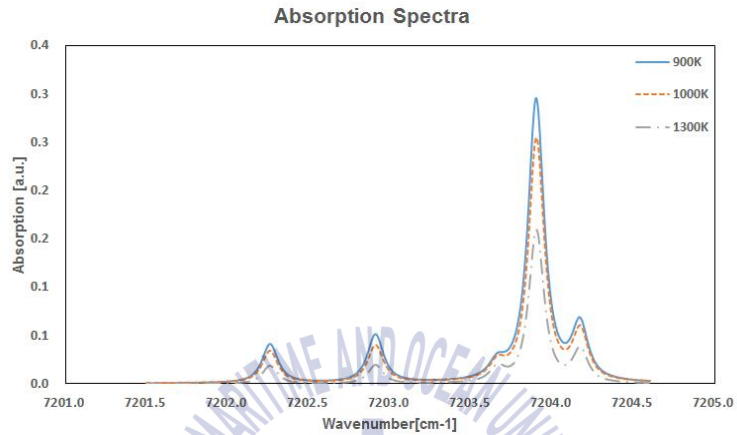


Fig. 2.5 H₂O absorption spectrum of three temperature (900K, 1000K, 1100K) at 1388.0nm ~ 1388.6nm

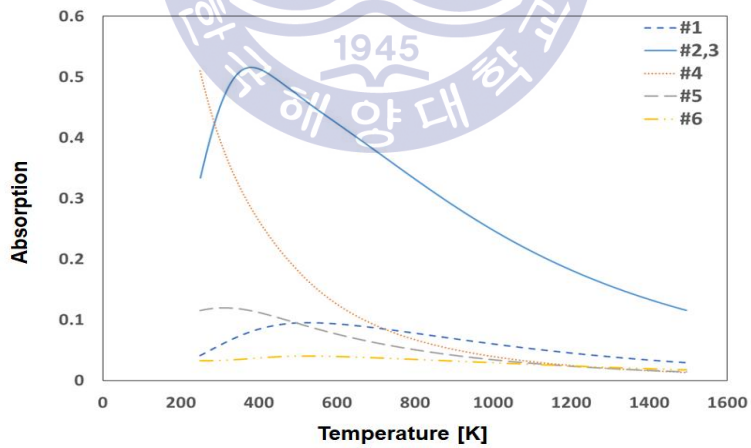


Fig. 2.6 Temperature dependence of six lines

Table. 2.2 HITRAN2008 absorption database

Frequency [cm ⁻¹]	Wavelength [nm]	Line- Strength [cm ⁻¹ · atm ⁻¹]	E'' [cm ⁻¹]
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	5.65×10^{-2}	742.0762
7203.894	1388.138	1.88×10^{-2}	742.073
7203.935	1388.130	4.53×10^{-4}	285.4186
7203.950	1388.127	1.77×10^{-6}	1050.158
7203.968	1388.124	9.65×10^{-7}	2042.31
7204.030	1388.112	1.20×10^{-4}	1640.506
7204.053	1388.107	1.65×10^{-9}	3299.991
7204.069	1388.104	4.83×10^{-9}	1474.98
7204.135	1388.092	1.70×10^{-5}	1772.414
7204.166	1388.086	7.89×10^{-3}	931.237
7204.232	1388.073	2.86×10^{-9}	3058.398
7204.353	1388.050	4.63×10^{-7}	2439.954
7204.426	1388.036	1.21×10^{-8}	2248.063
7204.546	1388.013	3.36×10^{-8}	1525.135

Table. 2.3 Variables to calculate temperature at #1 ~ #6

Wavelength λ [nm]	Line- Strength [cm ⁻¹ ·atm ⁻¹]	E" [cm ⁻¹]	Air-Broadening		Temperature-dependence coefficient	
			Low Temperature	High Temperature	Low Temperature	High Temperature
1388.453	2.73×10^{-2}	446.51	0.086	0.16	0.7	0.37
1388.326	1.15×10^{-1}	70.09	0.1022		0.69	
1388.183	1.59×10^{-4}	1742.30	0.0899		0.69	
1388.136	1.88×10^{-2}	742.08	0.0534		0.67	
1388.135	5.65×10^{-2}	742.07	0.0451		0.67	
1388.085	7.88×10^{-3}	931.24	0.077		0.61	

2.4.2 Exponential curve fitting

Fig 2.4와 같은 흡수신호를 Fig 2.5와 같은 흡수스펙트럼 데이터로 변환시키기 위해 선행연구(2D Temperature Measurement of CT-TDLAS by Using Two-Ratios-of-Three-Peaks Algorithm)(D.W Choi et al; 2016)에서는 식(2.26)과 같은 Polynomial equation (6th-order)를 사용하여 curve fitting을 사용하였는데, 측정된 흡수신호와 완전히 동일한 곡선을 구현할 수 없는데서 발생하는 오차를 포함하고 있다. 본 연구에서는 측정신호를 보다 정확하게 흡수스펙트럼으로 변환하기 위해 식(2.27) Exponential curve fitting을 이용하였다.

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 \quad (2.26)$$

$$f(x) = e^{a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6} \quad (2.27)$$

Fig 2.7는 Polynomial curve fitting 적용 시 흡수스펙트럼을 나타내고, Fig 2.8은 Exponential curve fitting 적용 시 흡수스펙트럼을 보여준다. 스펙트럼 비교 분석 시 차이가 거의 없는 것으로 보이지만 각 curve fitting 적용 시, #1과 #2의 값을 비교할 때 차이를 확인할 수 있다. Table 2.3은 각각의 curve fitting 적용 시 #1에서의 차, Table 2.4는 #2에서의 차를 나타낸다. #1에서는 Exponential curve fitting 적용 시의 값이 더 큰 것

을 확인 할 수 있고, 대조적으로 #2에서는 Polynomial curve fitting 적용 시 값이 더 큰 것을 알 수 있다. 이를 좀더 명확히 비교 분석을 위해 흡수 강도비(#1/#2)의 값을 비교하였고 결과는 Table 2.4와 같다. Polynomial curve fitting시 레이저선들의 흡수 강도비 평균값은 1.186, Exponential curve fitting시 1.201으로 Polynomial보다 0.015 높은 값을 가졌다. 이는 curve fitting의 오차가 줄어들어 따라 민감도가 더욱 향상되어 보다 높은 온도영역에서의 측정이 가능함을 의미한다.



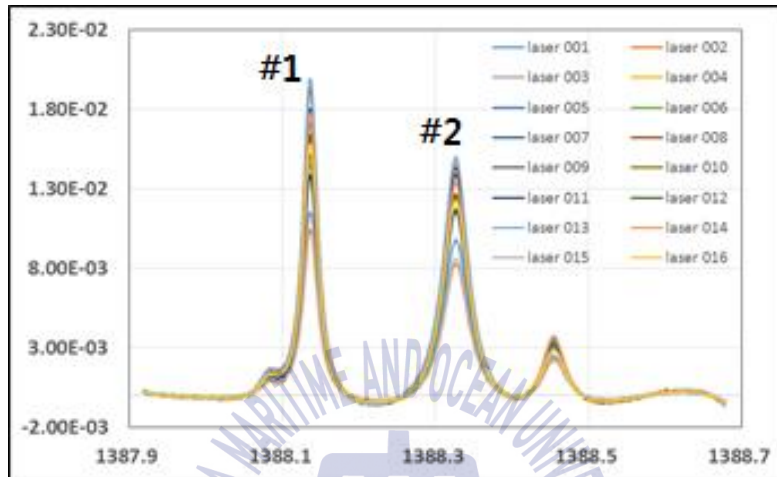


Fig. 2.7 Absorption spectrum using polynomial equation

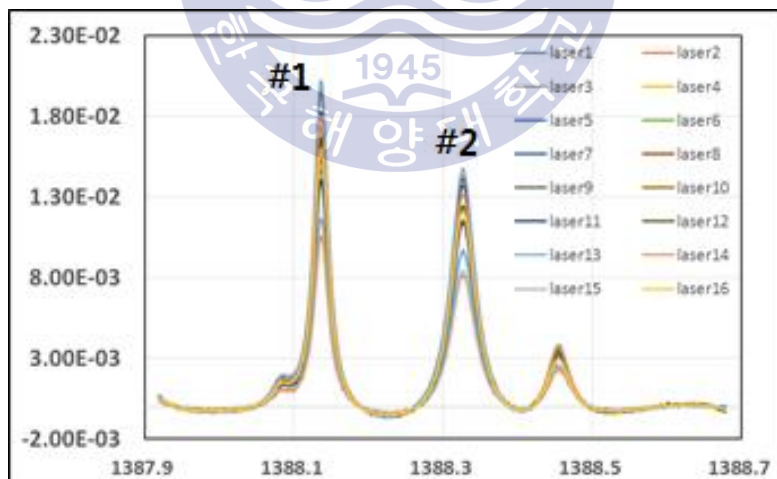


Fig. 2.8 Absorption spectrum using exponential equation

Table. 2.3 Difference between exponential and polynomial curve fitting at #1 & #2

Laser number	Exponential Max #1	6th order Max #1	Difference
1	0.011611	0.011470	0.00014
2	0.010528	0.010391	0.00014
3	0.020195	0.019898	0.00030
4	0.015262	0.015032	0.00023
5	0.017353	0.017103	0.00025
6	0.014664	0.014513	0.00015
7	0.018214	0.017995	0.00022
8	0.019509	0.019278	0.00023
9	0.015346	0.015125	0.00022
10	0.016415	0.016205	0.00021
11	0.014027	0.013830	0.00020
12	0.016605	0.016375	0.00023
13	0.020065	0.019770	0.00030
14	0.017977	0.017725	0.00025
15	0.011449	0.011260	0.00019
16	0.015976	0.015781	0.00020

Laser number	Exponential Max #2	6th order Max #2	Difference
1	0.009683	0.009802	-0.00012
2	0.008129	0.008244	-0.00011
3	0.014363	0.014614	-0.00025
4	0.011567	0.011761	-0.00019
5	0.012164	0.012374	-0.00021
6	0.011511	0.011639	-0.00013
7	0.013705	0.013892	-0.00019
8	0.014133	0.014328	-0.0002
9	0.011476	0.011662	-0.00019
10	0.012435	0.012612	-0.00018
11	0.011426	0.011592	-0.00017
12	0.012410	0.012606	-0.0002
13	0.014766	0.015015	-0.00025
14	0.013132	0.013344	-0.00021
15	0.008409	0.008570	-0.00016
16	0.012096	0.012262	-0.00017

Table. 2.5 Intensity ratio for each curve fitting

Laser number	Exponential	6th order
	#1/#2	#1/#2
1	1.199112	1.170169
2	1.295116	1.260432
3	1.406043	1.361571
4	1.319443	1.278123
5	1.426587	1.382172
6	1.273912	1.246928
7	1.329004	1.29535
8	1.380386	1.345477
9	1.337226	1.296947
10	1.320064	1.284887
11	1.227639	1.193064
12	1.338034	1.298985
13	1.358865	1.316683
14	1.368946	1.328312
15	1.361517	1.313886
16	1.320767	1.286984

2.4.3 Weighted curve fitting

다항식의 curve fitting 적용 시 Fig 2.9에서 볼 수 있듯이 흡수스펙트럼에서 음수가 나온 부분을 확인 할 수 있다. 세기를 나타내는 흡수선강도는 음수의 값을 가질 수 없지만, curve fitting의 과정에서 발생하는 오차로 인하여 음수를 포함하게 된다. 현재까지 진행된 연구에서는 음수가 나오는 부분을 축 이동(Axis-shifting) 혹은 제거함으로써 보간을 하였는데 이러한 방법들은 흡수 강도의 비를 이용하여 온도 산정하는 CT-TDLAS에서는 많은 오차를 포함하므로 정확한 온도분포를 알아내는데 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 음수가 나오는 영역에 가중치 계수(Coefficient of Weight)를 고려하였고 가중치 계수는 식(2.28)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Coefficient of weight} = \sum_{i=1}^n w_i (F(x_i) - f(x_i))^2 \quad (2.28)$$

위 절에서 언급한 Exponential curve fitting에 가중치 계수를 적용하였으며 결과는 Fig 2.10과 같다. 가중치 계수 적용 전 스펙트럼(Fig 2.7)에서 음수가 값을 가지는 영역들은 계수 적용 시 사라진 것을 확인 할 수 있다.

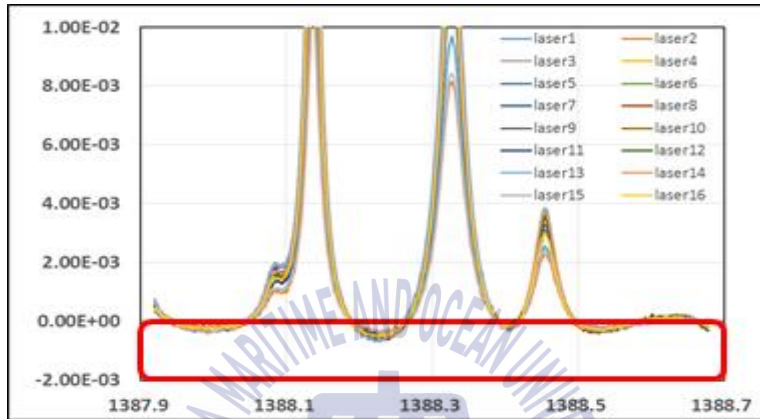


Fig. 2.9 Absorption spectrum before applying coefficient of weight

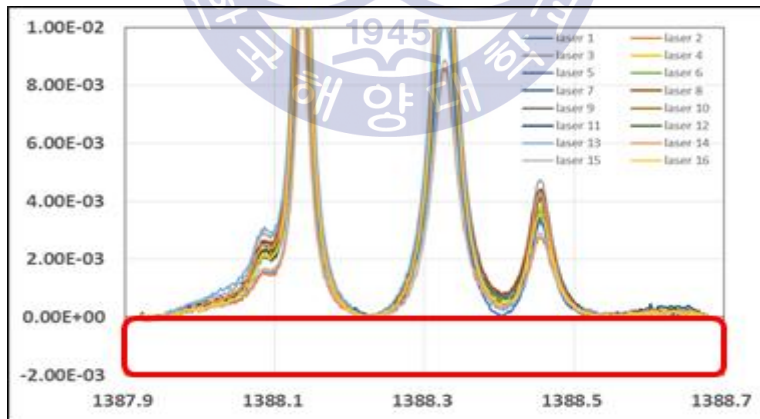


Fig. 2.10 Absorption spectrum after applying coefficient of weight

2.5 Computed-Tomography Reconstruction

현재 의학적으로 주로 사용되고 있는 CT(Computed-Tomography, 컴퓨터 단층촬영)기법은 X선을 인체에 조사하여 인체의 횡단면상을 얻어내는 방법이다. X선을 $0 \sim 180^\circ$ 로 회전하면서 얻은 흡수강도 데이터들은 2차원의 평면도로 재구성 된다. 이러한 재구성방법을 TDLAS에 적용 시 Fig 2.11와 같이 각 격자의 흡수 계수 값을 알아 낼 수 있고 이를 이용하여 2차원 온도분포와 농도분포의 산정이 가능하다.

현재까지 진행된 연구에서 사용된 재구성 알고리즘(Reconstruction Algorithm)은 MART(Multiple Algebraic Reconstruction Technique)법으로 선행연구(Improvements of Tomographic Quantification Technique for Temperature and Concentration Fields using a Multiple Algebraic Reconstruction Techniques)(M.G. Jeon et al; 2014)에서 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법에 비해 더 좋은 재구성 성능을 나타내 MART법을 사용해왔다. 본 절에서는 현재까지 적용된 MART법과 또 다른 재구성 알고리즘인 SMART(Simultaneous Multiple Algebraic Reconstruction Technique)과 비교평가에 대한 내용을 포함하고 있다.

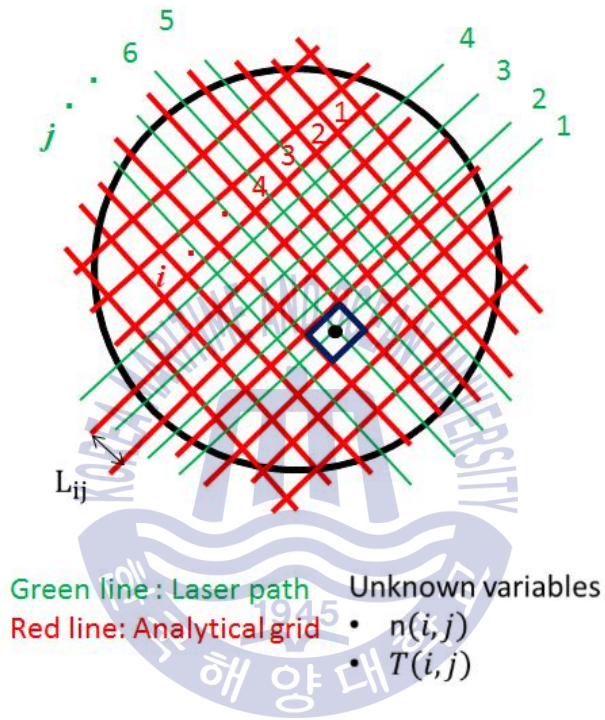


Fig. 2.11 Analysis grid and laser beam path

2.5.1 MART Method

MART법은 곱셈을 이용한 반복계산 알고리즘으로써 ART법과 비교 시 빠른 수렴 속도를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 측정된 흡수량과 계산된 흡수량의 편차가 최소가 될 때 까지 반복적 계산 방법으로써 식(2.29)와 같다.(An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry)(Callum Atkinson et al; 2009)

$$\alpha_{\lambda,j}(i)^{k+1} = \alpha_{\lambda,j}(i)^{(k)} \times \left[\frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I L_{i,j}^2} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (2.29)$$

λ 는 파장, i 는 셀 번호, j 는 레이저 path 번호, L 은 흡수선의 길이, α 는 흡수 계수, A 는 측정된 흡수량, β (Relaxation Parameter, $0 < \beta < 1$)는 계산 수렴 속도를 빠르게 해주는 가중치이다. 각 계산 횟수(Iteration)마다 가로 레이저, 세로레이저 순번으로 계산을 실시하며 새로운 흡수 계수의 값 $\alpha(i)^{k+1}$ 을 얻으면 Fig 2.12과 같은 순서도를 이용해 최소 오차에 수렴하게 된다.

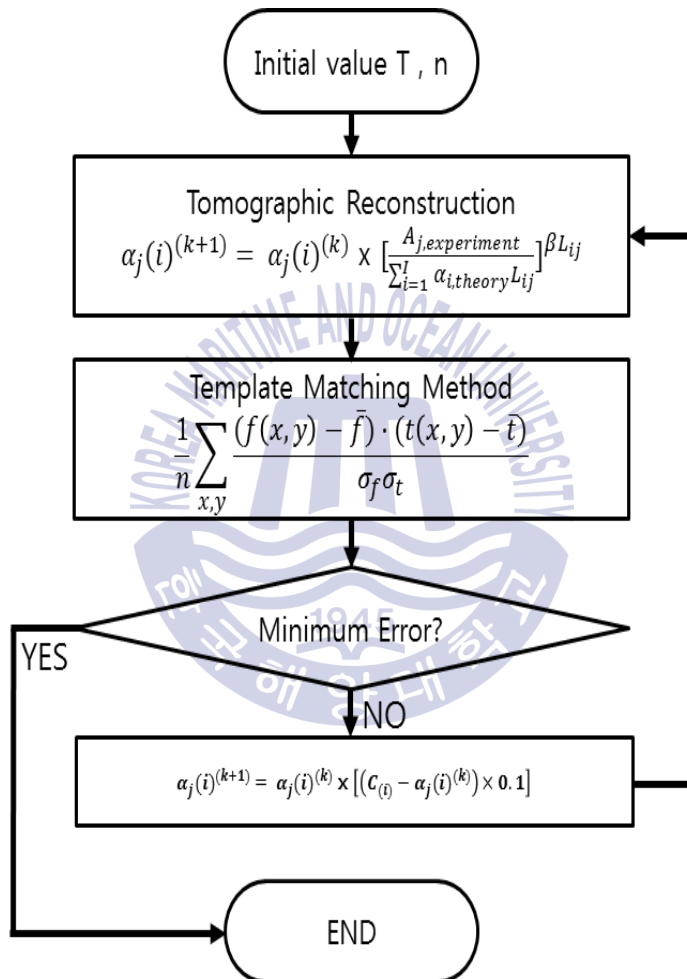


Fig. 2.12 Flow chart of pattern matching algorithm

2.5.2 SMART Method

SMART법은 MART법과 마찬가지로 곱셈을 이용한 반복계산 알고리즘이지만, 선행 연구(Improvements of Tomographic Quantification Technique for Temperature and Concentration Fields using a Multiple Algebraic Reconstruction Techniques)(M.G Jeon, 2014)에서 사용된 MART법과 달리 Exponential 함수와 Log 함수를 포함하는 방법이다. 마찬가지로 측정된 흡수량과 계산된 흡수량의 편차가 최소가 될 때 까지 반복하여 계산하는 방법으로 식(2.30)과 같이 나타 낼 수 있다.(Performances of New Reconstruction Algorithms for CT-TDLAS)(M.G Jeon et al; 2016)

$$\alpha_{\lambda,i}(i)^{k+1} = \alpha_{\lambda,j}(i)^{(k)} \times \sum_{i=1}^{N_i} \left[\left(\frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^i \alpha_n^k \cdot L_{i,j}} \right)^{\beta L_{i,j}} \right]^{1/N_i} \quad (2.30)$$

MART법과 달리 SMART법은 1회 계산 시 가로와 세로를 동시에 계산하여 흡수 계수를 계산한다. 즉, MART법은 Iteration 2회 시 가로세로의 계산이 수행된다고 하면, SMART법은 Iteration 1회에 가로세로 계산이 진행된다. 마찬가지로 Fig 2.10과 같은 순서도를 통하여 오차가 최소인 온도분포를 구하게 된다.

2.5.3 MART & SMART 비교평가

MART법과 SMART의 성능 비교평가를 위해 가상의 흡수데이터($A_{\lambda,j}^{\text{virtual}}$)를 구현하였고 path는 4x4로 설정하였다. 초기값은 선행연구(Evaluations on Performances of a Measurement Technique for Temperature and Concentration Fields Based on a TDLAS)(K.N Kim, 2016)에서 PLOS(Plus Line Of Sight)법 보다 MLOS(Multiple Line Of Sight)법이 더 좋은 성능을 나타냈으므로 MLOS법을 선정하였다. MART법에서 사용된 β 의 값은 0.1이 최적을 나타내어 0.1로 선정하였다. 성능평가는 MART법의 계산 20회 반복 시 표준편차(Standard Deviation)와 SMART법 계산 10회 반복 시 표준편차의 값을 비교하여 평가하였다.

Fig 2.13은 MART법 적용 시 각 Grid에서의 흡수 계수값, Fig 2.14는 SMART법 적용 시 각 Grid에서의 흡수 계수값을 나타낸다. Grid value의 합과 가상의 흡수값 비교 시 MART법 보다 SMART법의 오차가 더 적은 것을 확인 할 수 있었다. 계산 속도의 비교를 위해 계산 반복횟수에 따른 표준 편차 변화량을 이용하였다. Fig. 2.15은 MART법과 SMART법 적용 시 적용 시 표준편차의 변화를 보여준다. SMART법은 약 5회 계산 반복 시 표준편차가 0에 가까이 수렴한 반면, MART법은 약 13회 가량 계산 반복 후 표준편차가 0에 가까워졌음을 확인 할 수 있다.

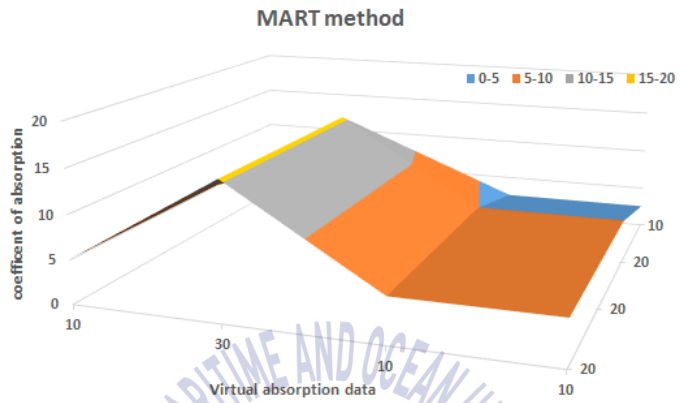


Fig. 2.13 Distribution of coefficient of absorption using MART method

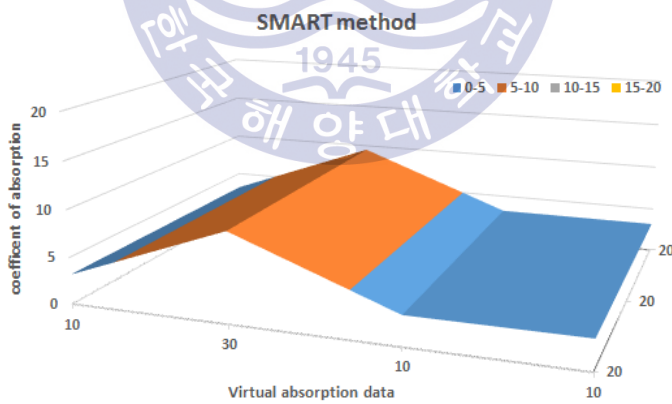


Fig. 2.14 Distribution of coefficient of absorption using SMART method

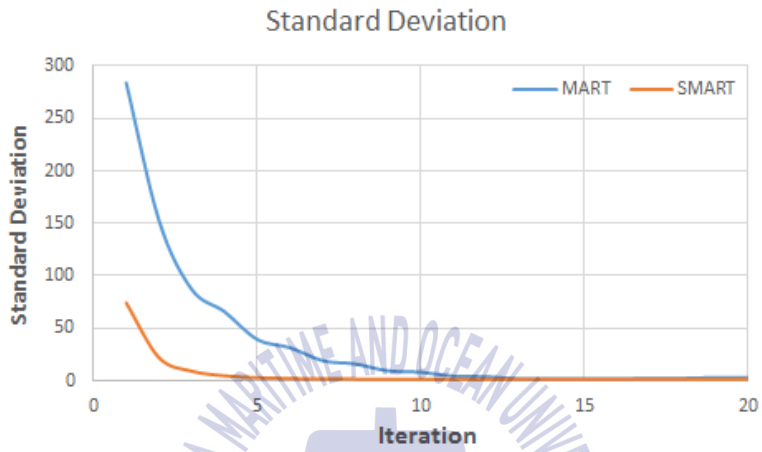


Fig. 2.15 Standard deviation for MART and SMART



제3장 TDLAS 구축 및 실험결과

3.1 TDLAS 실험장치 및 실험방법

CT-TDLAS의 실험 개략도는 Fig. 3.1과 같다. Function Generator에서 발생된 파형이 Laser Diode Controller로 전달되고 여기서 레이저 온도, 전류값을 설정하여 레이저로 신호를 전달한다. 전달된 신호는 레이저에서 발진되어 Beam Splitter를 거쳐 32 paths의 레이저로 조사된다. 고온영역을 지나 Photodetector로 측정된 흡수선은 Memory Hicorder에서 측정된다.

본 연구에서는 H₂O의 흡수선 데이터를 얻기 위해 1388.0nm ~ 1388.6 nm의 레이저 파장대를 사용하였고 레이저 주파수는 1kHz, 파형은 흡수선의 Curve fitting에 용이한 톱니파(Sawtooth)로 설정하였다. 측정영역은 2개의 층으로 나누었고 각 측정영역의 간격은 15mm, 레이저 배열은 8×8 path로 설정하였고 측정영역의 직경은 80mm이다. 측정 셀에 대한 개략도는 Fig. 3.2와 같다. Fig. 3.3은 Function Generator와 Laser Diode Controller, Memory Hicorder 장비를 보여주며 Fig. 3.4는 레이저와 Beam Splitter를 나타낸다.

온도장과 농도장의 측정은 2가지 경우로 나누어 진행하였다. 첫 번째 경

우로 상온(294K)에서 온도를 측정하였고, 두 번째는 고온부로 엔진 배기가스의 온도와 비슷한 범위를 가지는 연소장을 만들기 위해 균일한 연소 상태를 가지는 LPG 버너를 이용하였고 온도 범위는 300 ~ 800K 이다.



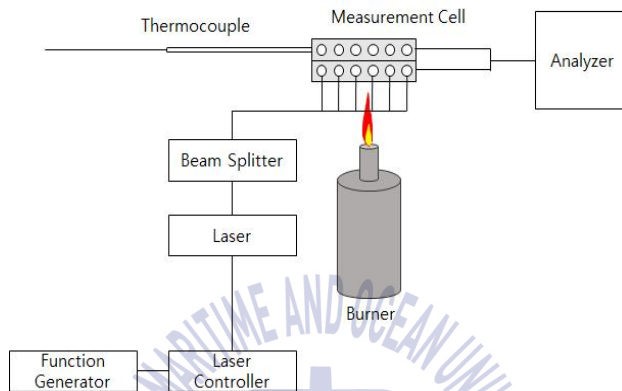


Fig. 3.1 Schematic of CT-TDLAS

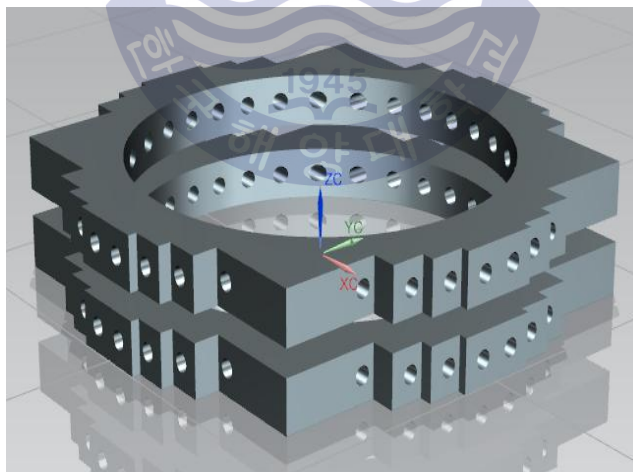


Fig. 3.2 Experimental cell

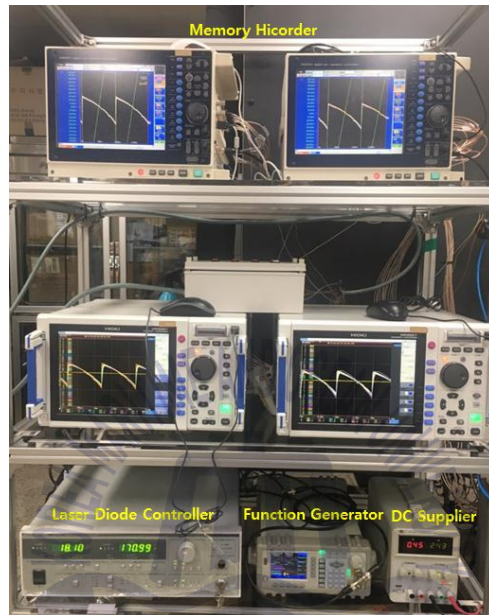


Fig. 3.3 Equipment of TDLAS I

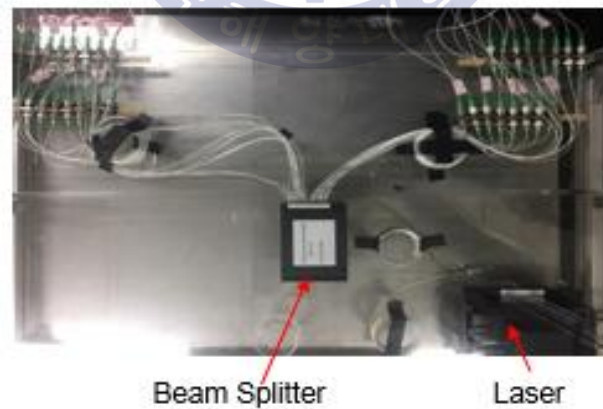


Fig. 3.4 Equipment of TDLAS II

3.2 TDLAS 온도장 농도장 재구성 결과

상온(294K)에서 측정된 흡수 스펙트럼은 Fig. 3.5, 3.6과 같다. 레이저별 흡수 스펙트럼 비교 시 각 피크점(#1,#2,#3)에서 진폭차이가 있으나 피크점의 피(#1/#2, #1/#3)에는 차이가 거의 없는 것을 확인 할 수 있다. 각 레이저의 흡수스펙트럼들을 바탕으로 온도장으로 재구성한 결과는 Fig. 3.7와 같다. 평균적으로 각 층의 온도측정값은 300K대로 전반적으로 균일하게 나타났고 온도오차 최대12K을 나타냈다. 농도분포인 Fig. 3.8도 마찬가지로 균일한 분포값을 가졌으며 최대 0.001 정도의 차를 보였다.

고온(800K)의 조건을 만들기 위해 LPG 버너를 이용하였고 측정된 흡수스펙트럼 결과는 Fig. 3.9, 3.10과 같다. 상온 스펙트럼 대비 #1과 #2의 비가 확연히 달라진 것을 알 수 있다. 또한, 연소 중심부(Laser 3~6, 11~14)로 갈수록 #1,#2의 흡수량 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 이 흡수스펙트럼들을 바탕으로 2차원 평면의 온도분포로 재구성한 결과는 Fig. 3.11과 같다. 첫 층에서의 온도범위는 312~774K으로 나타났으며 두 번째 층에서는 311~783K의 온도범위를 가졌다. 각 층에서 측정된 온도분포는 중심부 온도가 가장 높게 나타났으며 실제로도 불꽃 위치는 중심에 위치하였다. 이를 3차원 분포로 나타내면 Fig. 3.12와 같다. Fig. 3.13은 연소 시 농도장 재구성결과이며 연소가 일어나는 부분에서 가장 높은 농도값을 가지는 것을 볼 수 있다.

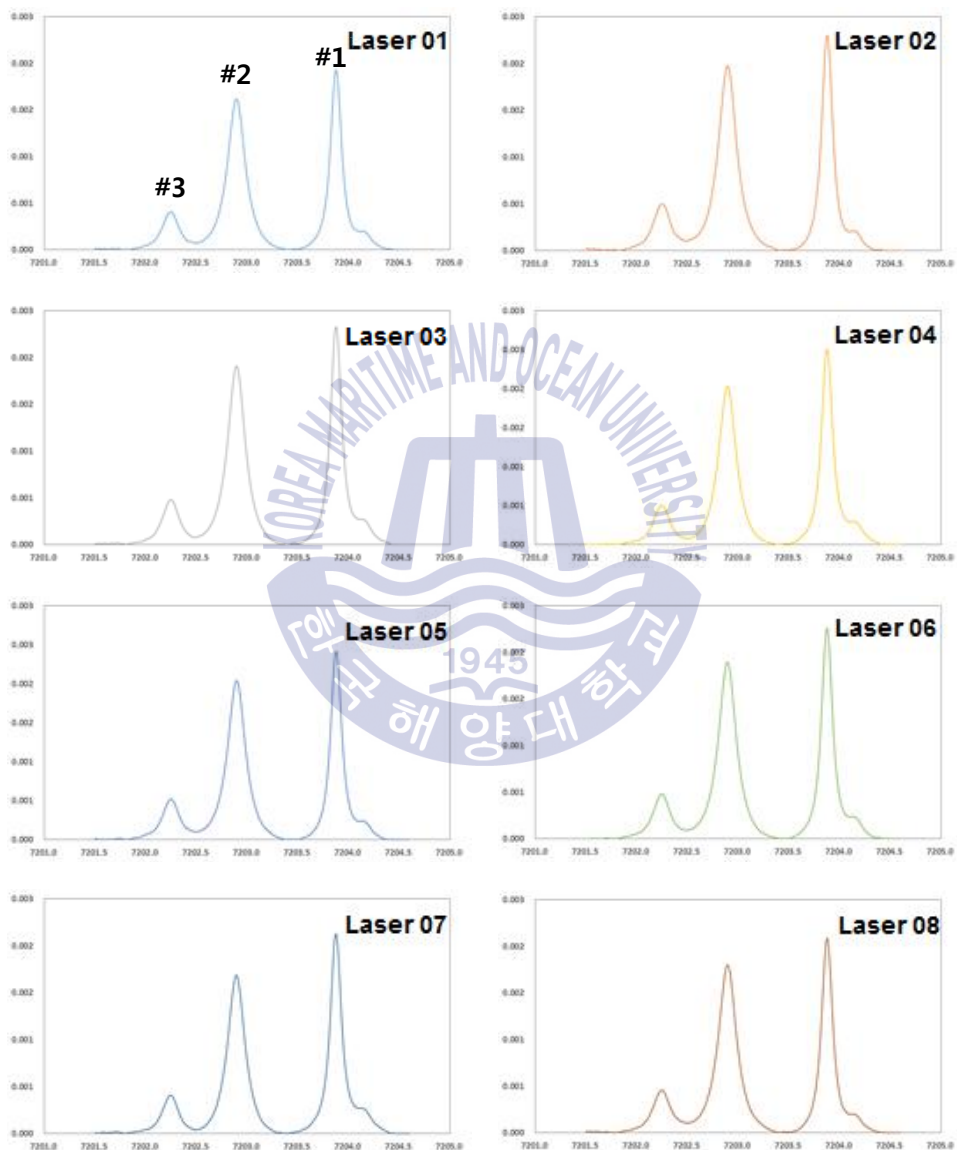


Fig. 3.5 Absorption spectra for laser 01-08 at room temperature(294K)

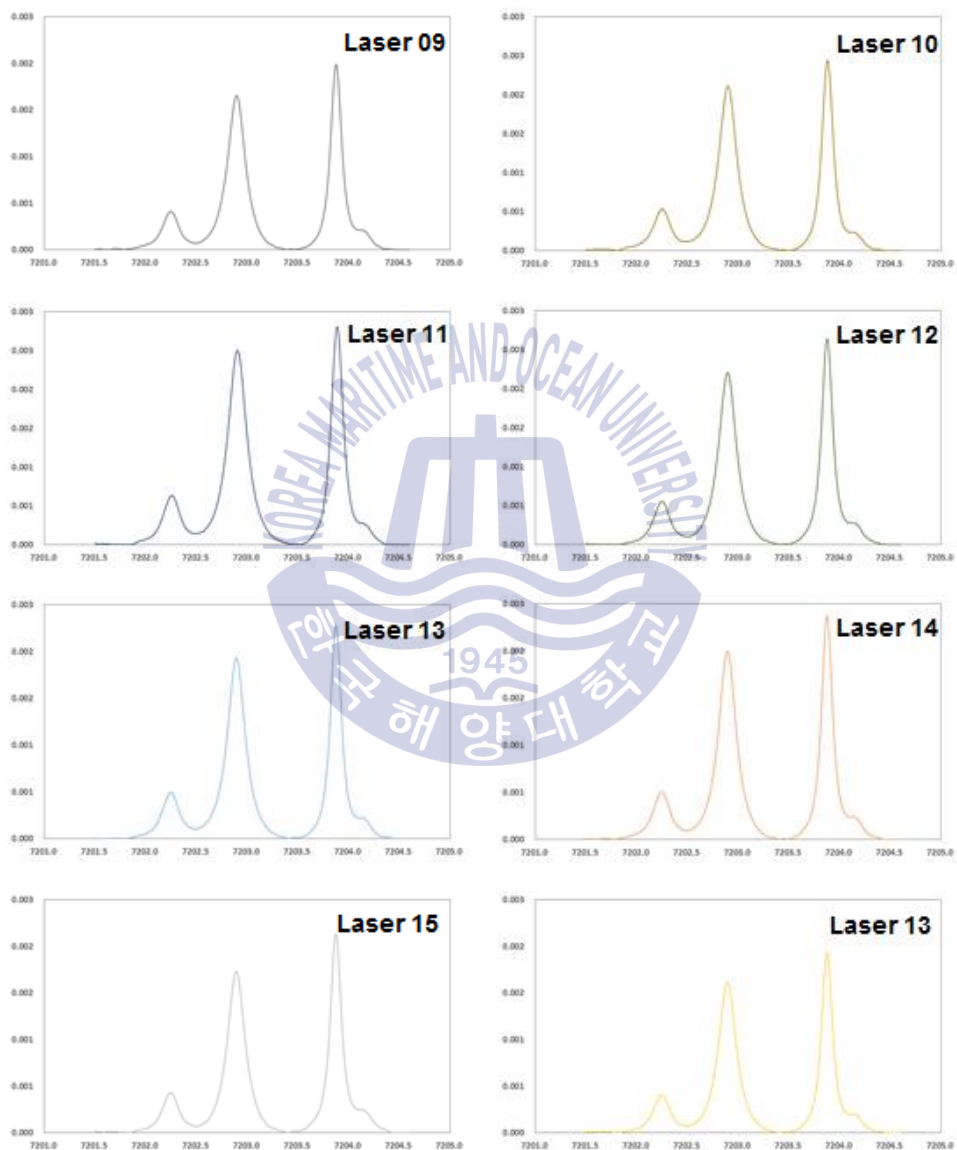
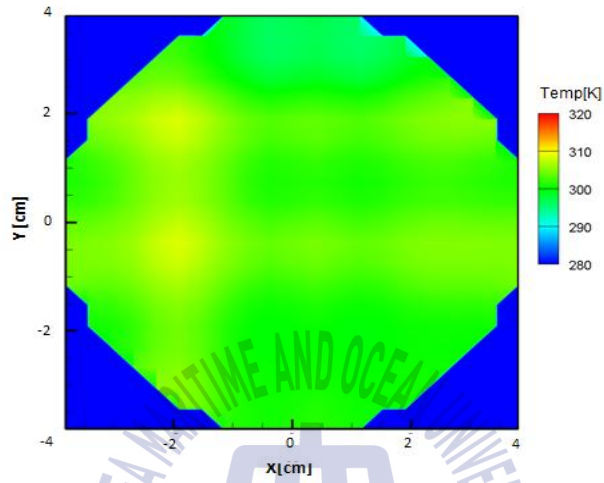
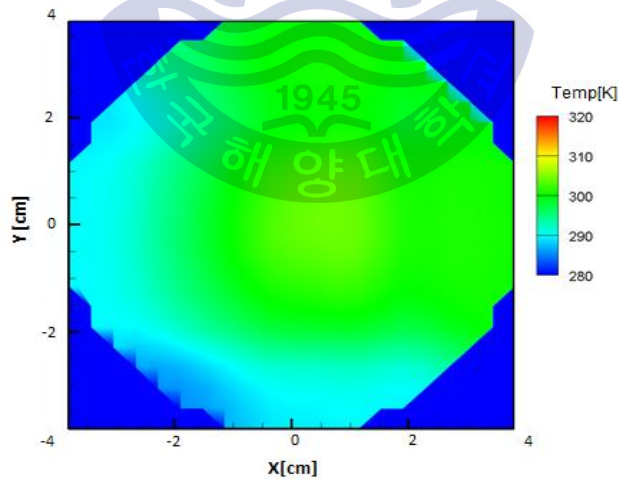


Fig. 3.6 Absorption spectra for laser 09-16 at room temperature(294K)

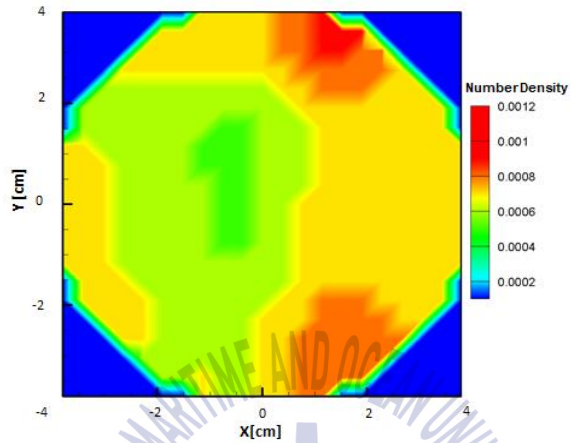


(a) Temperature distribution at 1st layer

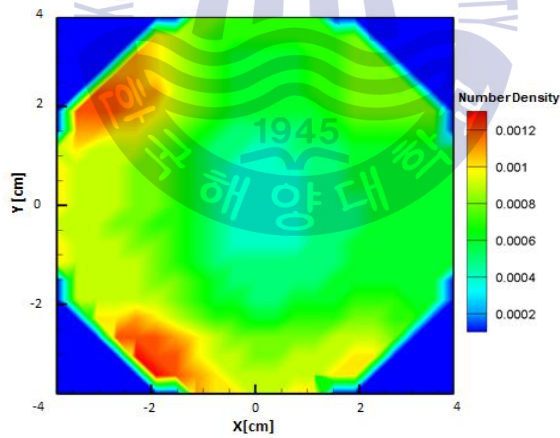


(b) Temperature distribution at 2nd layer

Fig. 3.7 Temperature distributions at room temperature(294K)



(a) Concentration distribution at 1st layer



(b) Concentration distribution at 2nd layer

Fig. 3.8 Concentration distributions at room temperature(294K)

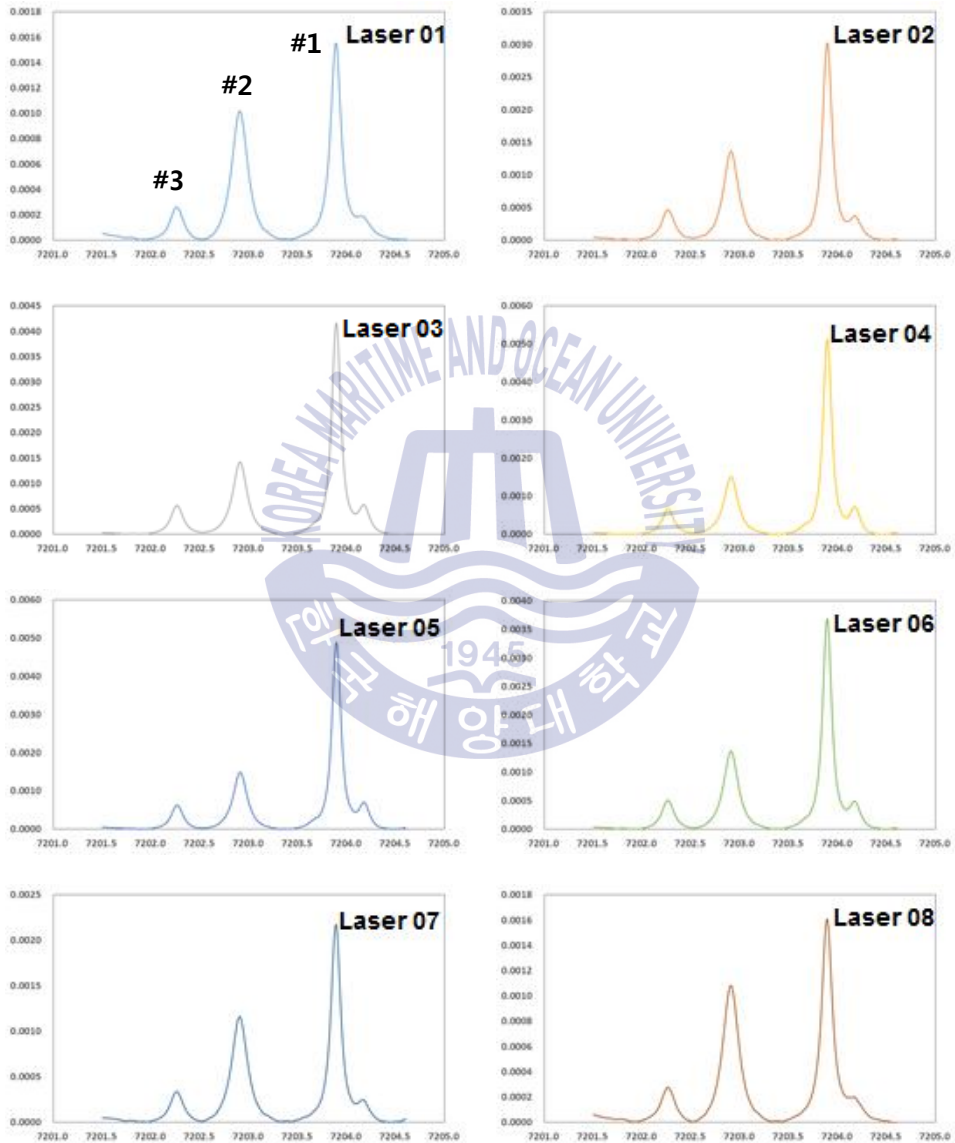


Fig. 3.9 Absorption spectra for laser 01-08 at high temperature(800K)

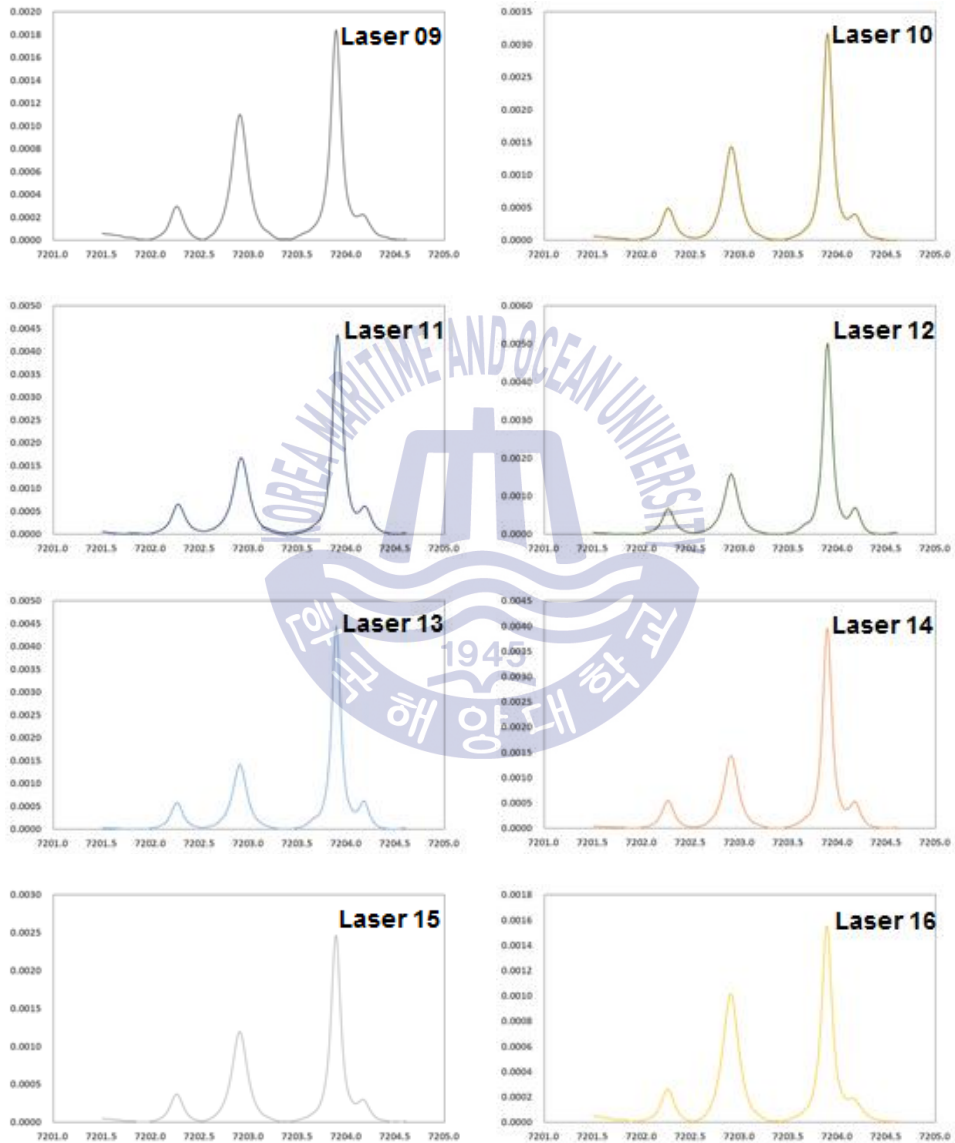
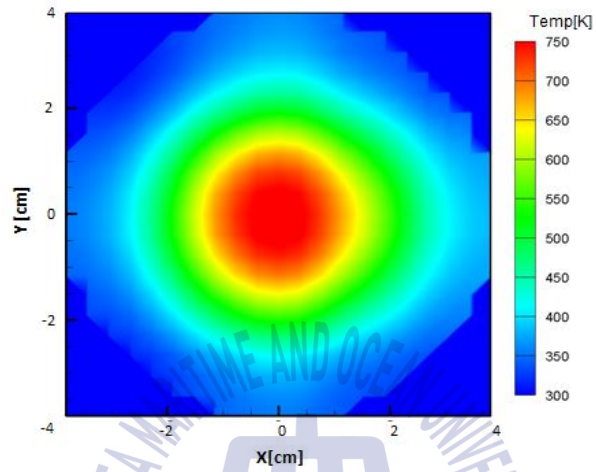
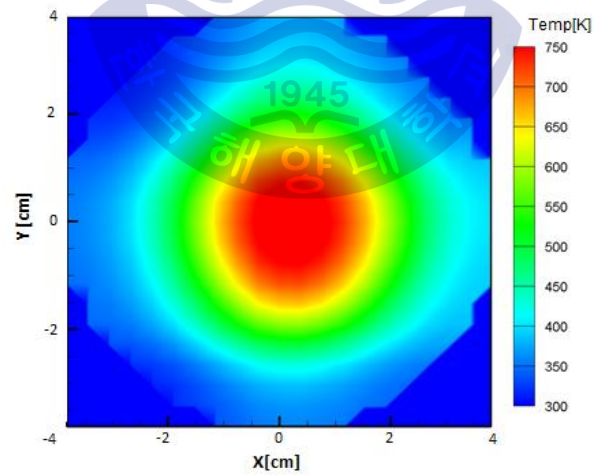


Fig. 3.10 Absorption spectra for laser 09-16 at high temperature(800K)

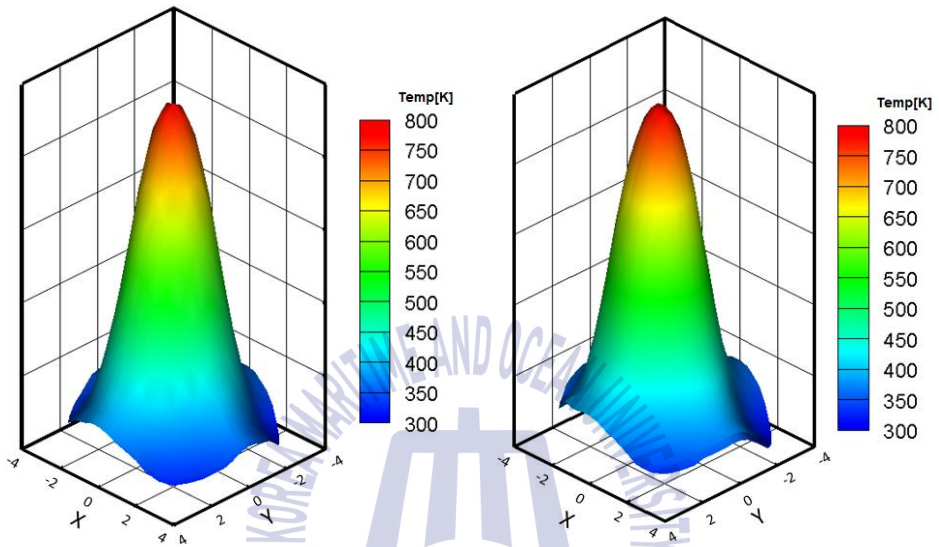


(a) Temperature distribution at 1st layer



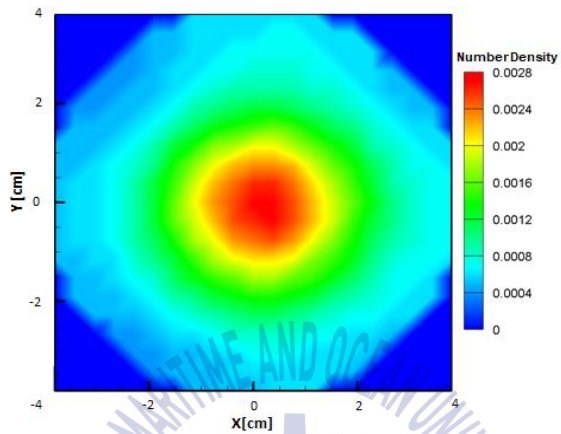
(b) Temperature distribution at 2nd layer

Fig. 3.11 Temperature distributions I at high temperature(800K)

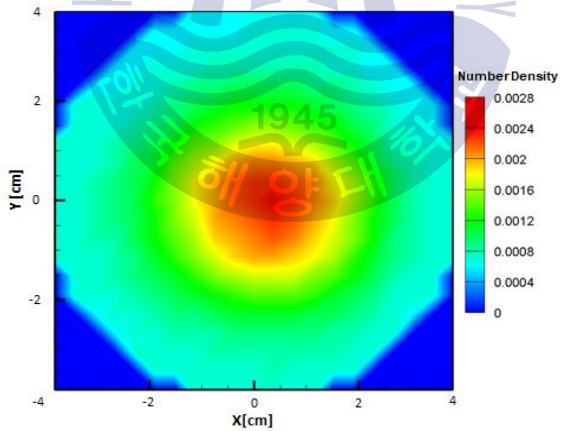


(a) 3D temperature distribution at 1st layer (b) 3D temperature distribution at 2nd layer

Fig. 3.12 Temperature distributions II at high temperature(800K)



(a) Concentration Distribution at 1st Layer



(b) Concentration Distribution at 2nd Layer

Fig. 3.13 Concentration distributions at high temperature(800K)

제4장 CT-TDLAS 성능평가

4.1 Thermocouple 온도측정 비교

CT-TDLAS의 온도측정 결과에 대한 성능검토를 위해 연소 실험 시 Fig. 4.1과 같이 64개의 레이저 교점에서 Thermocouple을 이용하여 연소온도를 측정하였고, 측정은 각 층에서 5회 반복하였다. 반복하여 측정된 온도값을 평균하여 이를 대표온도로 선정하였다. 5회 반복 측정 시 1층에서의 표준편차는 1~55K의 범위를 가졌으며 2층에서는 표준편차는 1~24K의 범위를 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

각 층 64점에서 Thermocouple을 이용하여 측정된 결과는 Fig. 4.2와 같고 1층에서의 측정된 온도범위는 309~773K, 2층에서는 312~722K의 결과를 나타냈다. CT-TDLAS를 이용하여 64점에서 온도를 추출한 결과는 Fig. 4.3에서 확인 할 수 있다. 1층에서의 측정된 온도범위는 312~764K이며 Thermocouple에 의해 측정된 온도측정 결과와 거의 비슷한 온도범위를 가졌다. 2층에서는 최소 311K, 최대 781K의 온도범위로 Thermocouple과 비교 시 고온부에서 59K 정도의 차이를 나타냈다. Fig. 4.4는 64개의 교점에서 CT-TDLAS로 측정된 온도와 Thermocouple로 측정된 온도의 차 나타낸다. 1층에서는 최소 -13K에서 최대 108K, 2층에서는 -14 ~ 159K의 온도오차범위를 보였다.

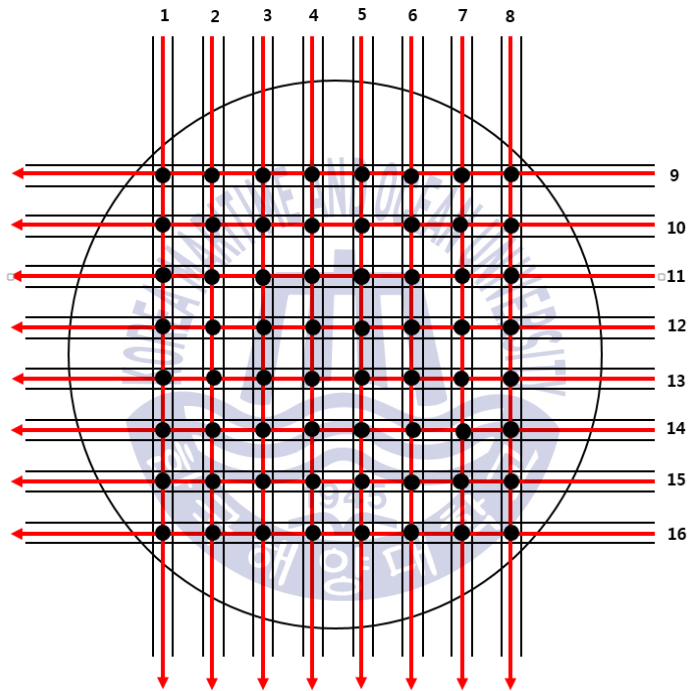


Fig. 4.1 Temperature measuring points using thermocouples

(단위 : K)

317	334	378	402	393	362	340	320
324	371	468	525	509	443	391	337
335	418	573	675	649	539	447	361
341	447	623	773	773	633	501	386
341	446	595	724	731	602	466	367
325	393	478	554	563	486	392	335
311	339	368	402	408	372	330	312
310	318	326	337	339	327	315	309

(a) Temperature field measured by thermocouple at 1st layer

329	353	401	427	421	391	365	334
341	397	494	548	531	469	414	354
358	447	580	661	636	543	457	373
357	456	605	722	718	601	484	385
358	454	569	658	655	550	440	362
336	401	469	523	522	454	378	333
318	346	372	398	400	367	332	316
312	320	327	335	336	325	316	312

(b) Temperature field measured by thermocouple at 2nd layer

Fig. 4.2 Temperature fields measured by thermocouple for 64 points

(단위 : K)

327	353	391	419	417	382	357	339
357	415	496	554	550	481	421	373
397	497	622	695	690	603	505	416
424	553	694	764	760	673	565	447
417	542	682	753	749	661	553	440
381	469	585	657	652	566	477	399
337	387	452	499	497	439	392	351
312	338	373	397	396	365	342	323

(a) Temperature field measured by CT-TDLAS at 1st layer

333	347	387	430	438	413	376	357
368	408	492	581	597	544	456	397
397	470	599	708	726	666	544	439
416	511	657	765	781	725	597	468
410	499	641	751	767	709	581	458
375	434	544	648	666	605	494	409
332	366	431	502	515	471	403	358
311	328	367	407	414	392	358	337

(b) Temperature field measured by CT-TDLAS at 2nd layer

Fig. 4.3 Temperature fields measured by CT-TDLAS for 64 points

(단위 : 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

(a) The temperature difference for each points at 1st layer

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

(b) The temperature difference for each points at 2nd layer

Fig. 4.4 Temperature difference for each points between CT-TDLAS and Thermocouple

4.2 성능평가

CT-TDLAS와 Thermocouple의 지점별 온도측정 결과의 차이를 명확히 확인하기 위해 Fig. 4.5와 같이 각 Path에서 각 지점의 측정온도를 비교하였으며 첫 번째 층의 결과는 Fig. 4.6, 두 번째 층의 결과는 Fig. 4.7과 같다. 1층에서 불꽃의 중심(path 4~5, -0.4~0.4cm)과 불꽃에서 멀리 떨어져있는 지점(Path1,2,8)에서의 온도는 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 불꽃중심의 주변부에서의 온도 측정값 차이가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 CT-TDLAS와 Thermocouple 온도측정의 최소차는 2K, 최대차는 108K으로 나타났다. 2층에서도 마찬가지로 불꽃에서 멀리 떨어질수록 온도차는 줄어드는 것을 볼 수 있지만 불꽃 중심부 측정온도차가 1층보다 다소 증가하였으며 마찬가지로 불꽃 주변부에서 큰 차이를 보였다. 2층에서 측정된 온도의 최소차는 1K, 최대 159K으로 측정되었다. 온도측정에 대해 정확성이 입증된 계측기인 Thermocouple의 측정값이 더 정확하다고 가정하고 식(4.1)을 이용하여 각 지점에서의 오차율을 계산해보았고 그 결과는 Fig. 4.8과 같다.

$$Error\ rate[\%] = \left| \frac{T_c - T_t}{T_c} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

T_c = Temperature measured by CT-TDLAS

T_t = Temperature measured by Thermocouple

첫 번째 층에서 오차율은 최소 0%, 최대 24%로 계산되었으며 저온부인 측정영역의 가장자리는 오차가 낮은편에 속하고 불꽃중심의 주변에서 큰 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 두 번째 층에서 오차율은 최소 0%, 최대 33%로 나타났으며 1층과 마찬가지로 측정영역의 가장자리에서는 오차가 낮고 불꽃중심의 주변부 오차가 높은 것을 볼 수 있다.

두 계측기로부터 측정된 결과의 분포를 검토하기 위해 불꽃 중심부 (Length가 0 cm인 단면과 path4와 5 사이의 단면)에서 측정된 값을 식 (4.2)을 이용하여 정규화(Normalization)하였다.

$$T_{n,i} = \frac{T_i - E(T)}{\sigma_d} \quad (4.2)$$

T_i = Temperature for each intersection[K]

$E(T)$ = Average Temperature[K]

σ_d = Standard Deviation Temperature[K]

정규화된 온도분포의 편차는 1층에서는 CT-TDLAS와 Thermocouple이 거의 동일하게 나타났고 2층에서는 위치에 따라 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Thermocouple 측정위치점과 CT-TDLAS 측정위치점이 100% 일치하지 않았음을 의미한다.

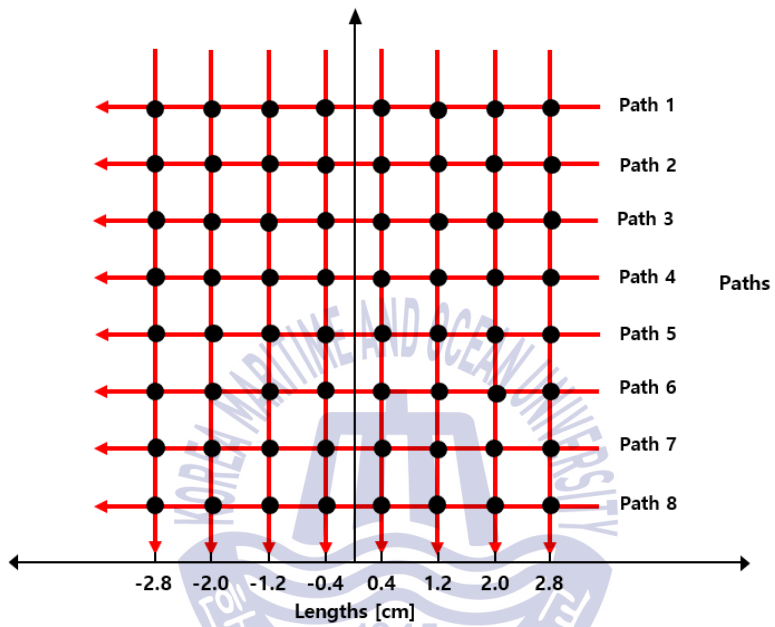
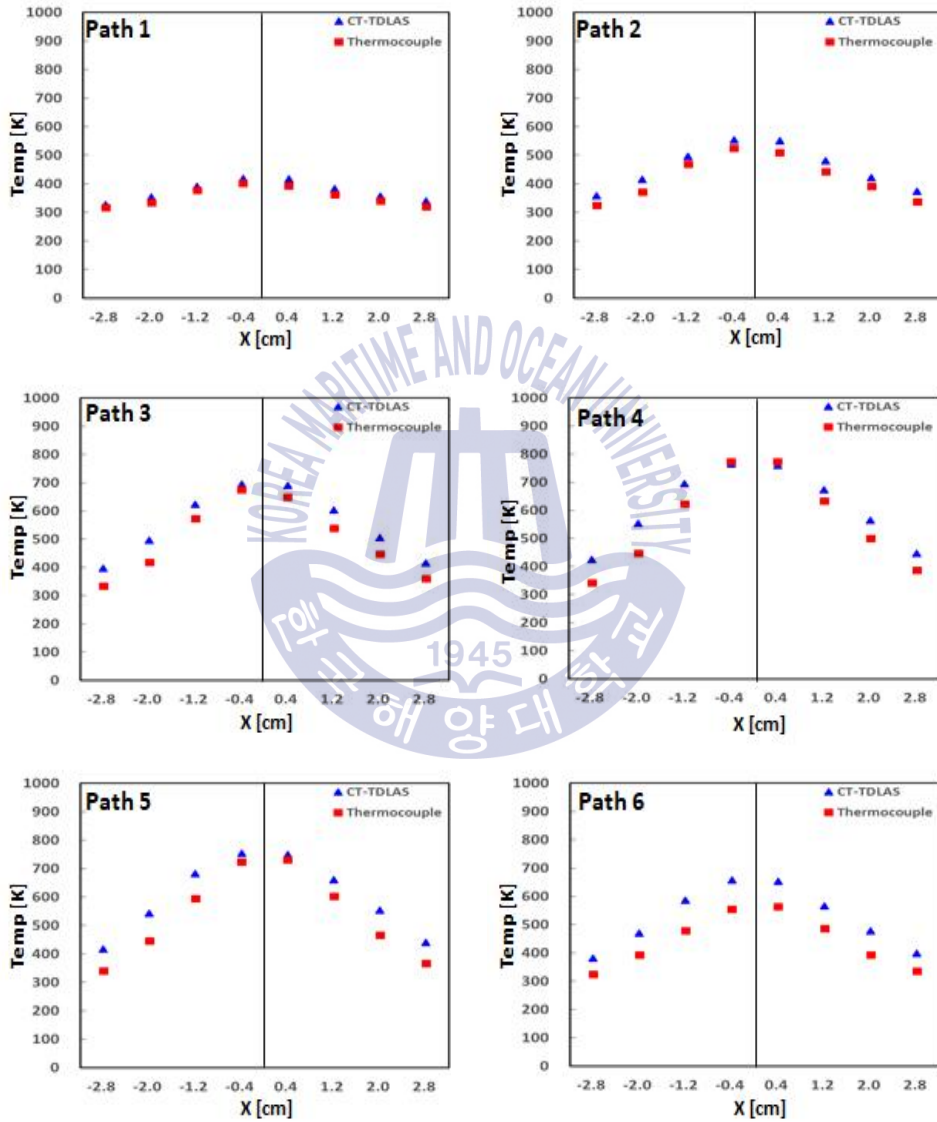


Fig. 4.5 Comparison points for each paths



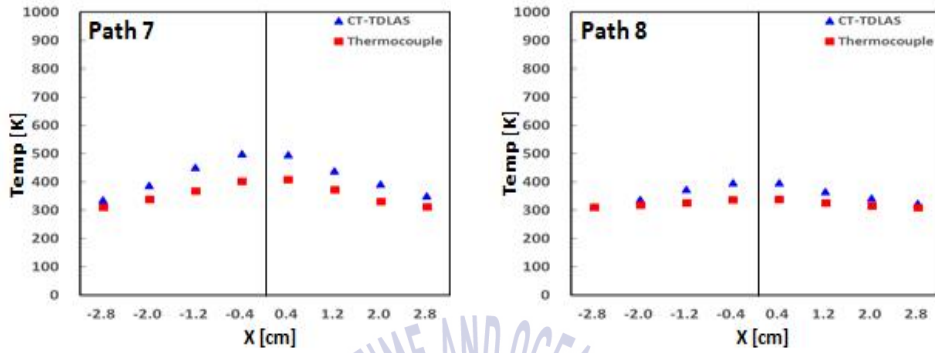
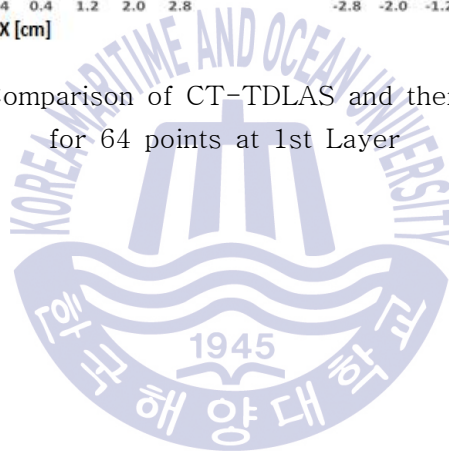
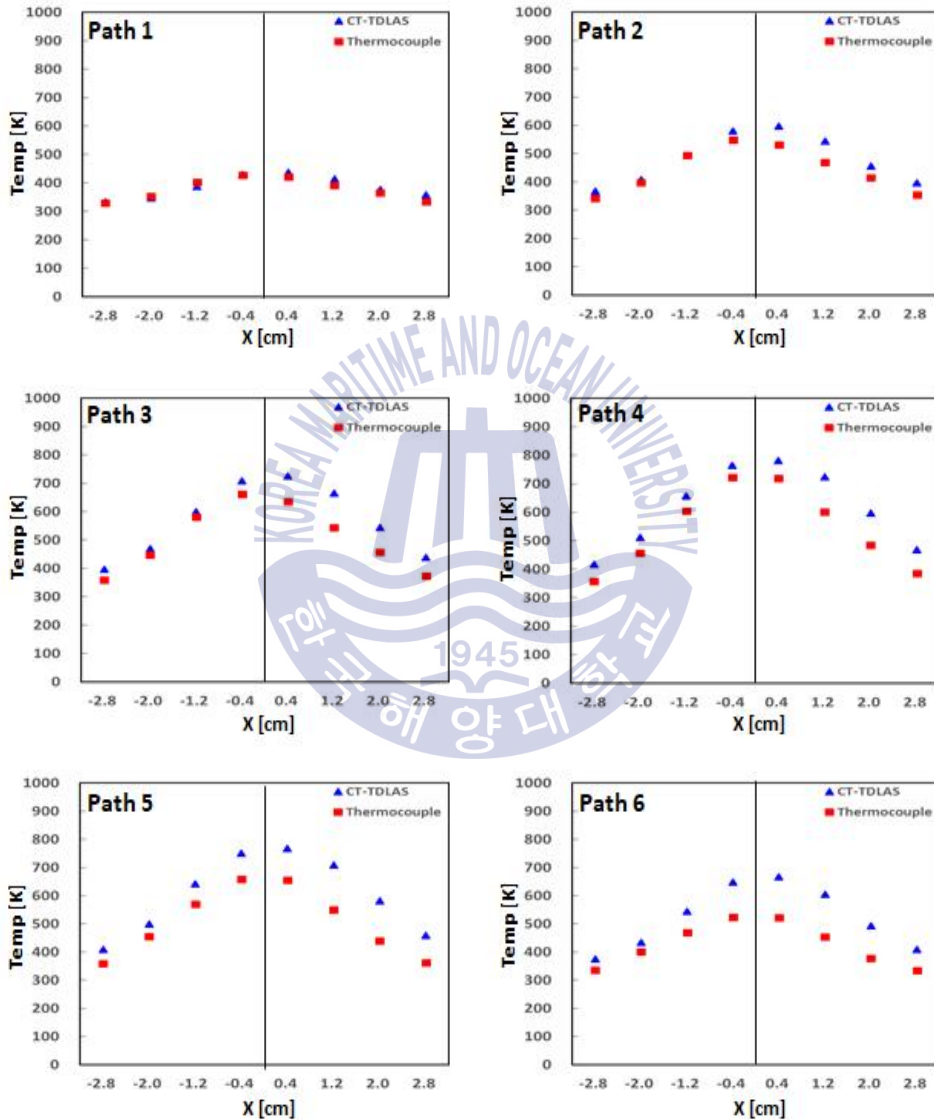


Fig. 4.6 Comparison of CT-TDLAS and thermocouple for 64 points at 1st Layer





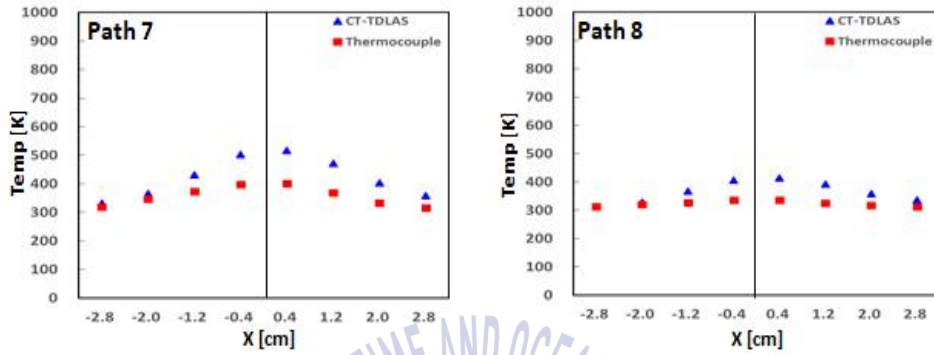
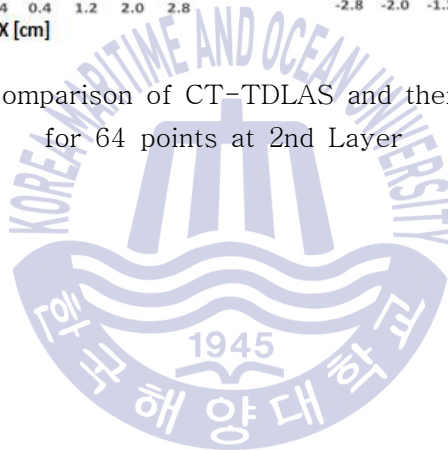


Fig. 4.7 Comparison of CT-TDLAS and thermocouple for 64 points at 2nd Layer



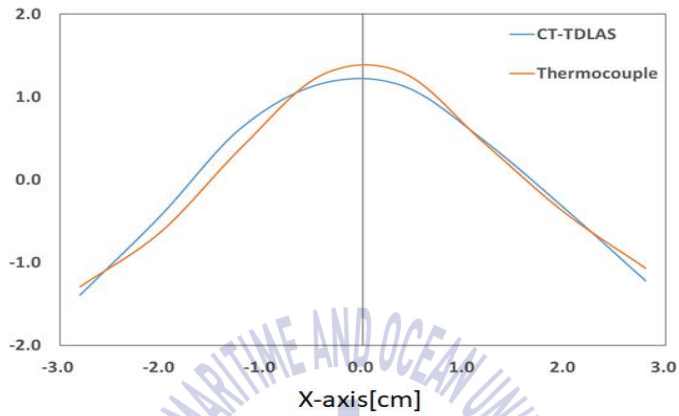
3%	6%	3%	4%	6%	6%	5%	6%
10%	12%	6%	5%	8%	9%	8%	10%
19%	19%	9%	3%	6%	12%	13%	15%
24%	24%	11%	1%	2%	6%	13%	16%
23%	22%	15%	4%	3%	10%	19%	20%
17%	19%	23%	19%	16%	17%	22%	19%
8%	14%	23%	24%	22%	18%	19%	12%
0%	6%	15%	18%	17%	12%	9%	4%

(a) Errors for each grids at 1st Layer

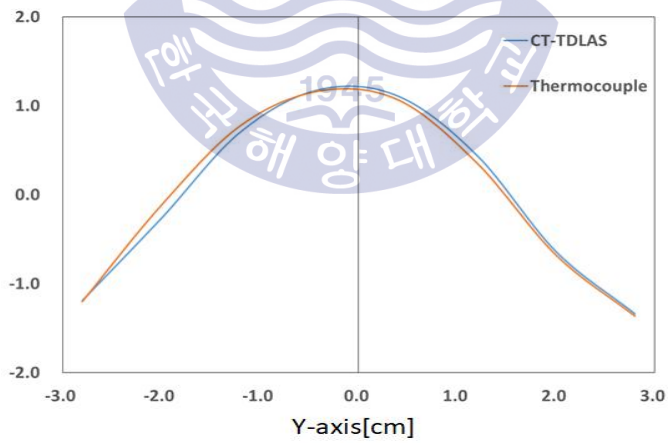
1%	2%	4%	1%	4%	6%	3%	7%
8%	3%	0%	6%	12%	16%	10%	12%
11%	5%	3%	7%	14%	23%	19%	18%
17%	12%	9%	6%	9%	21%	23%	22%
14%	10%	13%	14%	17%	29%	32%	27%
12%	8%	16%	24%	28%	33%	31%	23%
4%	6%	16%	26%	29%	28%	22%	14%
0%	2%	12%	21%	23%	21%	13%	8%

(b) Errors for each grids at 2nd Layer

Fig. 4.8 Errors rate[%] for each points at 1st & 2nd Layers

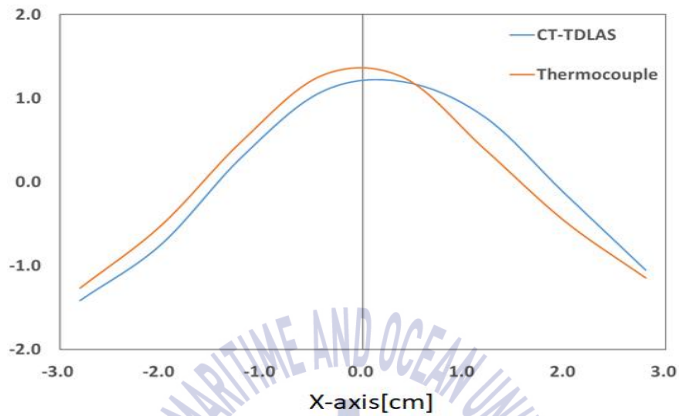


(a) Plane between path 4 & 5

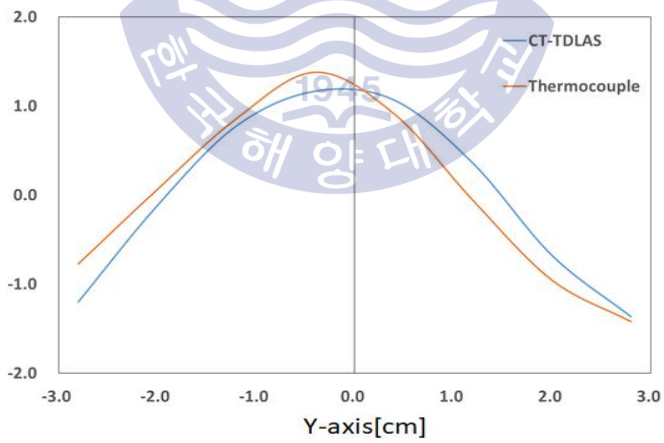


(b) Plane at X=0cm

Fig . 4.9 Normalization graphs for 1st layer



(a) Plane between path 4 & 5



(b) Plane at X=0cm

Fig . 4.10 Normalization graphs for 2nd layer

제5장 결론 및 고찰

본 연구에서는 CT-TDLAS를 이용한 연소장에서의 3차원 온도·농도분포 측정법 개발 및 성능평가를 실시하였다. 상온에서의 측정결과는 각 층에서 5%미만으로 우수한 측정결과를 얻을 수 있었다. 연소 시 측정된 최소오차는 0%(측정영역의 가장자리)이고 최대 33%(불꽃의 주변부)를 나타냈다. 오차가 발생된 원인은 아래와 같이 크게 4가지로 나눌 수 있다.

1. 연소상태에 대한 가변성이다. 실험 시, 지속적으로 완전 연소상태를 유지하기 위해 연소가스(LPG)와 공기의 일정비(1:10)로 혼합하여 유지하여 연소시켰으나 간헐적으로 불완전 연소가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 연소온도에 큰 영향을 주며 계측 시 영향을 주었을 가능성이 있다.
2. 실험에 의해 결정되는 HITRAN Database값의 오차로 인하여 이론 흡수스펙트럼이 정확하지 않아 온도오차를 나타낸 것으로 예상되며 이 부분은 반복 실험을 통하여 최적의 값을 찾을 수 있을 것으로 예상된다.
3. 본 연구에서 사용된 1388nm 레이저 파장대의 문제로 1388nm는 Fig. 2.6에서 보이는 것과 같이 고온부로 갈수록 흡수반응이 떨어지는 것을 알 수 있다. 높은 온도 계측 시 미세한 흡수반응을 바탕으로 온도를 계산하는 과정에 있어서 높은 오차를 포함하였을 가능성이 있다.

추후 연구에서는 고온부에서 반응성이 높은 1395nm와 1343nm 파장대 레이저를 적용하여 이러한 오차를 개선 할 예정이다.

4. Fig. 4.10에서 확인 할 수 있듯이 Thermocouple 계측 시 발생하는 오차이다. 각 레이저 교점에서 Thermocouple을 이용한 계측 시 마다 약간의 높이오차와 좌우 간격오차(각각0.5mm미만)가 있었다. 하지만 이러한 약간의 오차는 불꽃에 가까워질수록 큰 온도차를 나타내기 때문에 문제가 될 수 있다. 위 문제해결을 위해 Thermocouple 계측 장비보완이 더 필요하다고 판단된다.

위 언급한 4가지 문제를 해결한다면 CT-TDLAS를 이용하여 보다 더 정확한 온도·농도 측정값을 얻을 수 있을 것이며 더 많은 셀을 적층시킨다면 보다 정밀한 3차원 온도·농도분포를 얻을 수 있을 것이라 예상된다.

참고문헌

- [1] Deguchi, Y., Industrial applications of Laser Diagnostics, New York, CRS Press: Taylor & Francis 2011.
- [2] Ax, H., Stopper, U., Meier, W., Aigner, M., and uthe, F.G., (2010). Experimental Analysis of the Combustion Behavior of a Gas Turbine Burner by Laser Measurement Techniques. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 132, 051503, pp.1-9. (doi:10.1115/1.3205033)
- [3] Braeuer, A., and Leipertz, A., (2009). Two-dimensional Raman mole-fraction and temperature measurements for hydrogen-nitrogen mixture analysis. Applies optics, Vol.48, No.4, pp.B57-B64. (doi:10.1364/AO.48.000B57)
- [4] Jehlickaa, J., Viteka, P., Edwardsb, H.G.M., Heagravesb, M., and Capounc, T., (2009). Application of portable Raman instruments for fast and non-destructive detection of minerals on outcrops.

- [6] D.F. Swinehart (1962), Journal of Chemical Education, The Beer-Lambert Law
- [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] Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, Vol. 73, No. 3, pp. 410-419. (doi:10.1016/j.saa.2008.09.004)
- [9] Engel, S.R., Koch, P., Braeuer, A., and Leipertz, A., (2009). Simultaneous laser-induced fluorescence and Raman imaging inside

a hydrogen engine. Applied optics, Vol. 48, No. 35, pp.6643-6650
(doi:10.1364/AO.48.006643)

[10] Hou, H.M., Tian, Y., Li, Y., and Zheng, R.E., (2014). Study of pressure effects on laser induced plasma in bulk seawater. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, Vol.29, No. 1, pp.169-175. (doi:10.1039/C3JA50244A)

[11] Sun, D.X., Su, M.G., Dong, C.Z., and Wen, G.H., (2014). A comparative study of the laser induced breakdown spectroscopy in single- and collinear double-pulse laser geometry. Plasma Science and Technology, Vol.16, No. 4, pp. 374-379. (doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1009-0630/16/4/13>)

[12] G.D. Finn, D. Mugglestone, (1965). Tables of the Line Broadening Function $H(a, v)$, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 129, Issue 2, pp. 221-235 (doi: <https://doi.org/10.1093/mnras/129.2.221>)

[13] P.J. Chantry (1971). Doppler Broadening in Beam Experiments, The Journal of Chemical Physics, Volume 55, Issue 6, (doi: <https://doi.org/10.1063/1.1676489>)

- [14] Wan, X., and Wang, P., (2014). Remote Quantitative Analysis of Minerals Based on Multispectral Line-Calibrated Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Applied spectroscopy, Vol.68, No.10, pp. 1132-1136. (doi: 10.1039/C3JA50244A)
- [15] Eckbreth, A.C., Laser diagnostics for combustion temperature and species, Cambridge, Mass., ABACUS Press 1988.
- [16] B.Labani, J,Bonamy and D.Robert.(1986).Collisional broadening of rotation-vibration lines for asymmetric top molecules. The Journal of Chemical Physics, Vol.84, Issue 8 (doi : <https://doi.org/10.1063/1.450047>)
- [17] Allen, M.G., Carleton, K.L., Davis, S.J., Kessler, W.J., Otis, C.E., Palombo, D.A., and Sonnenfroh,D.M., (1995). Ultrasensitive dual-beam absorption and gain spectroscopy: Applications for nearinfrared and visible diode laser sensors. Applied Optics, Vol.34, No. 18, pp.3240-3249.
- [18] Goldenstein, C. S., Schultz, I. A., Spearrin, R. M., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K., (2014). Scannedwavelength-modulation spectroscopy near 2.5 μm for H₂O and temperature in a

- hydrocarbon-fueled scramjet combustor. Applied Physics B, Vol. 116, No.3, pp.717-727. (doi:10.1007/s00340-013-5755-0.)
- [19] Th. H. de Keijser, J. I. Langford, E. J. Mittemeijer and A. B. P. Vogels.(1982) Use of the Voigt function in a single-line method for the analysis of X-ray diffraction line broadening, Journal of Applied Crystallography, pp. 308-314 (doi : <https://doi.org/10.1107/S0021889882012035>)
- [20] Isao Kojima, Masayasu Kurahashi. (1987). Application of asymmetrical Gaussian/Lorentzian mixed function for X-ray photoelectron curve synthesis, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, vol.42, Issue 2, (doi : [https://doi.org/10.1016/0368-2048\(87\)85018-1](https://doi.org/10.1016/0368-2048(87)85018-1))
- [21] M.G Jeon. (2014), Improvements of Tomographic Quantification Technique for Temperature and Concentration Fields using a Multiple Algebraic Reconstruction Techniques, Experiments in Fluids, pp. 553-568, (doi : <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0728-0>)
- [22] Callum Atkinson , Julio Soria. (2009), An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image

velocimetry,

- [23] Min-Gyu Jeon, Yoshihiro Deguchi, Takahiro Kamimoto, Deog-Hee Doh, Gyeong-Rae Cho. (2016), Performances of New Reconstruction Algorithms for CT-TDLAS(Computer Tomography-Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), Applied Thermal Engineering, (doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.060>)
- [24] K.N Kim. (2016), Evaluations on Performances of a Measurement Technique for Temperature and Concentration Fields Based on a TDLAS
- [25] Spearrin, R. M., Goldenstein, C. S., Schultz, I. A., Jeffries, J. B. , and Hanson, R. K.,(2014). Simultaneous sensing of temperature, CO, and CO2 in a scramjet combustor using quantum cascade laser absorption spectroscopy. Applied Physics B: Lasers and Optics, Vol.117, No.2, pp. 689-698.
- [26] Yoshihiro Deguchi, Daisuke Yasui and Akira Adachi.(2012) Development of 2D Temperature and Concentration Measurement Method Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, Journal of Mechanics Engineering and Automation Vol. 2,

pp.543-549

- [27] Doo-Won Choi, Min-Gyu Jeon, Gyeong-Rae Cho, Takahiro Kamimoto, Yoshihiro Deguchi, and Deog-Hee Doh. (2016), Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), Journal of Thermal Science Vol.25, No.1 84-89
- [28] DOOWON CHOI, KWANGNAM KIM, GYONGRAE CHO, JOONHWAN SHIM, DONGHYUK KIM, YOSHIHIRO DEGUCHI, DEOGHEE DOH.(2016), 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, pp. 127~134
- [29] DOOWON CHOI, GYONGRAE CHO, JOONHWAN SHIM, YOSHIHIRO DEGUCHI, DONGHYUK KIM, DEOGHEE DOH.(2016), 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, pp. 318~327
- [30] DOOWON CHOI, GYONGRAE CHO, YOSHIHIRO DEGUCHI, TAESIL BAEK, DEOGHEE DOH. (2016), 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, pp. 773~782

[31] R. R. Gamache, S. Kennedy, R. Hawkins, L. S. Rothman. 2000
Journal of Molecular Structure 517-518 pp. 407-425,

