



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

흡수스펙트럼 재구성 알고리즘에 따른 TDLAS 성능
비교 평가 연구

A Study on TDLAS Performances Influenced by
Reconstruction Algorithms for Absorption Spectra



지도교수 도 덕 희

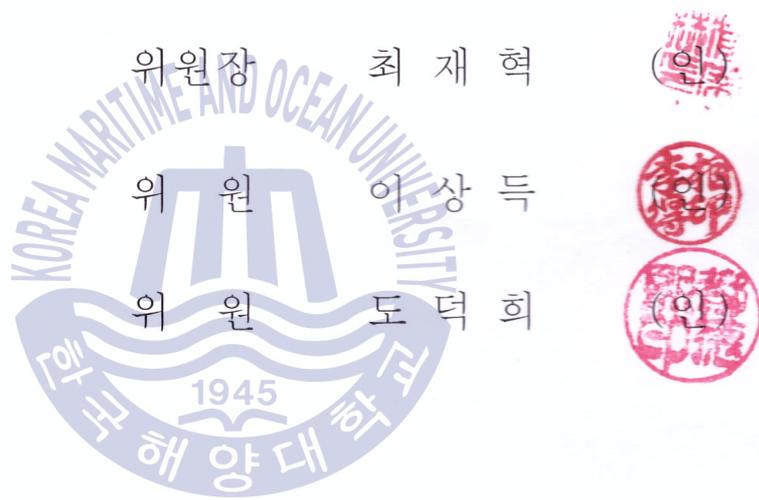
2017년 8월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과

홍 창 호

본 논문을 홍창호의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2017년 7월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract	I
제1장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 논문의 구성	5
제2장 CT-TDLAS 이론	6
2.1 흡수법(Absorption Methods) 원리	6
2.2 선폭확장 함수(Line Broadening Function)	9
2.3 재구성 알고리즘	15
제3장 Spectra Curve Fitting 알고리즘 성능평가	23
3.1 가상데이터 결과	23
3.2 one-Ratio-two-Peak curve fitting 법	35
3.3 two-Ratio-three-Peak curve fitting 법	38
3.4 상호상관법 기반 curve fitting 법	44
3.5 six-Peak curve fitting 법	48
3.6 각 fitting법의 비교 평가	51
제4장 결론 및 고찰	55
참고문헌	56

A Study on TDLAS Performances Influenced by Reconstruction Algorithms for Absorption Spectra

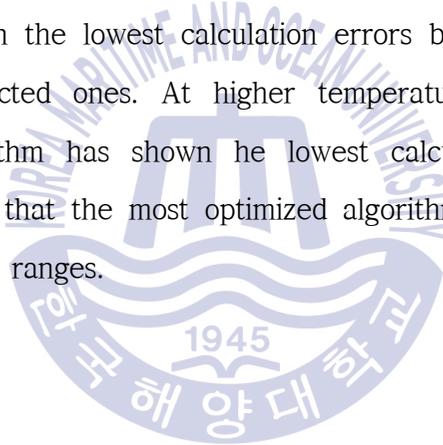
by Chang Ho Hong

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

Abstract

In this thesis paper, the influences and performances of the curve fitting algorithms of the CT-TDLAS have been evaluated by the use of phantom data. 11 x 11 absorption lines have been installed using the phantom data, which implies 121 grids have been installed on a virtual measurement area. The phantom data distribution have been generated based upon the Gaussian distribution for temperature and concentration distribution on the virtual measurement area. The light spectra of H₂O have been used for the evaluations. The phantom temperature data have been set to two temperature ranges, 300K~700K and 300K~1000K.

The phantom concentration data have been set to two temperature ranges, 0.02~0.14 and 0.02~0.18. The performances of four curve fitting algorithms, One-Ratio-two-Peaks (1R2P) curve fitting, two-Ratios-three-Peaks (2R3P) curve fitting, Cross-Correlation based curve fitting, six-peaks curve fitting, have been quantitatively compared each other using the phantom data. At lower temperature range, 2R3P algorithm has shown the lowest calculation errors between the phantom data and reconstructed ones. At higher temperature range, six-peaks curve fitting algorithm has shown the lowest calculation errors. From this, it can be said that the most optimized algorithm should be adopted for the temperature ranges.



제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

지구환경의 보전 및 에너지 효율향상에 관한 연구가 이어지고 있다. 지구온난화 물질이나 환경오염 물질의 배출저감 기술, 고효율연소기술 분야에서의 기술개발 요구가 고조되고 있다. 2011년 3월의 일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고를 계기로 천연가스를 연료로 하는 화력발전소의 중요성도 고조되고 있다. 한편, 국제해양오염방지협약(MARPOL, marine pollution)으로부터 2013년 1월 1일부터 새롭게 건조되는 모든 선박에는 에너지효율관리계획서(SEEMP, ship efficiency management plan)와 검사기관에서 공인한 국제에너지효율증서(IEE, international energy efficiency)를 비치해야만 항해를 할 수 있게 되었다. 이처럼 선박이나 자동차와 같이 수송기계로부터 배출되는 대기오염 가스에 대한 규제가 날이 갈수록 강화되고 있는 추세에 있다.

이러한 배경으로부터 수송용 기계나 발전소의 동력원에 해당되는 엔진이나 보일러의 버너(burner) 등에서의 연소현상에 중요성 또한 고조되고 있다. 이들 연소장에서의 과도상태에 대한 명확한 규명은 이들 기계의 효율향상과도 직결되는 관계로 최근에 많은 연구들이 이어지고 있다.

연소현상을 결정짓는 주요 인자가운데, 온도 및 농도는 연소상태를 좌

우하는 매우 중요한 인자이다. 엔진의 부하시에 배기가스 온도분포나 실린더 내의 연소현상의 해명, HC나 CO등의 미연소가스 배출저감 등을 달성하기 위해서는 연소가스에 대한 2차원 온도 및 농도분포를 고응답으로 시계열 측정할 필요가 있다. 엔진 내부의 가스 거동을 고응답으로 포착할 수 있다면, 보일러 가스터빈 등의 연소기기의 응용에도 가능하게 되므로 학술적 산업적으로 그 의의가 매우 크다(Deguchi, 2011).

최근, 비접촉식으로 고감도 고응답의 계측방법으로서 라만산란법(spontaneous Raman spectroscopy, CARS: coherent anti-Stokes Raman spectroscopy)(Ax et al.; 2010, Braeuer and Leipertz; 2009, Jehlickan et al.; 2009), 레이저여기형광법(LIF: laser-induced fluorescence) (Engel et al.; 2009) LIBS(laser-induced breakdown spectroscopy)법 (Hou et al.; 2014) 등의 레이저응용 계측기술이 개발되어 있으며 이들 가운데에서도 비용이 저렴하며 내구성이 좋은 반도체레이저를 이용한 흡수분광법을 활용한 고응답 다종성분 동시(온도, CO₂, NH₃, NO, CO, CH₄)계측기술 개발이 수행되어 왔다 (Deguchi; 2011, Eckbreth; 1988, Allen et al.; 1995, Goldenstein et al.; 2014, Spearrin et al.; 2014). 이들 연구들은 단일 흡수선에서의 가스농도에 반응하는 빛의 강도 감쇄량으로 평가를 하고 있는 것이어서 온도나 압력에 의해 빛의 강도가 변화해 버리면 측정이 불가능해진다. 이들은 특정가스 성분 에 대한 농도측정은 가능하지만 복수 성분을 포함하는 가스상태에

서는 적용될 수 없다. 측정가능한 것은 상대적 가스농도로서 절대량은 아니다. 이들은 복수가스 농도측정이 어려우며, 배경신호를 측정하기 어려운 단점이 있다. 또한, 고감도화를 위해 2개의 광검출기를 장착한 구조나 수광신호로부터 변조된 신호를 변조신호와 동일위상 및 위상차 동조신호로 복원하는 기구가 있는 경우에는 장치가 복잡하게 되는 단점이 있다.

Deguchi 등(2012)은 이들 방법을 개선한 2차원의 온도와 농도분포 측정이 가능한 CT-TDLAS법(computed tomography-tuneable diode laser absorption spectroscopy)을 개발한 바 있다. 이 연구에서 가장 중요한 것은 2차원적으로 배열된 광학센서로부터 얻어진 흡수스펙트럼을 여하히 재구성을 잘 하느냐에 달려 있다. 흡수스펙트럼을 재구성하기 위해서는 실험에서 얻어진 흡수스펙트럼 신호를 이론적 스펙트럼에 가깝게 정합을 시키는 과정과, 2차원 단면상으로 구성된 측정지점에서의 신호로 재구성하는 2개의 과정을 거쳐야 한다. CT-TDLAS법에서는 이 두 가지가 계산과정에서 동시에 수행되는데, Deguchi 등(2012)은 2차원 단면상의 재구성을 위한 알고리즘으로서 ART(algebraic reconstruction technique)법을 적용하였는데, 이들은 온도변화에 따라 변화하는 대표파장 3점에서의 흡수계수의 변화를 이용하여 ART법으로 온도 및 농도를 계산하였다. 이 방식에서는 대표파장 3점에서의 흡수계수가 고온부에서 그다지 큰 차이를 보이지 않게 된 관계로, 고온부에서의 측정오차가 큰 점이 단점이다.

Choi 등은 이를 개선하기 위하여 MART법기반의 1R2P법(Choi et al,; 2016a) 및 2R3P법(Choi et al,; 2016b), 상호상관법(Choi et al,; 2016c), 6점 알고리즘(Choi et al,; 2016d)을 제시한 바 있다.

그런데, 이들 방법들이 CT-TDLAS에서 적용되었을 때, 온도와 농도분포 측정 성능에 어떻게 영향을 미치게 되는 것인가에 대한 연구보고는 없다.

본 연구는 CT-TDLAS에서 이들 방법들이 가스의 온도분포와 농도분포 측정 성능에 어떻게 미치는가에 대한 정량적 평가를 수행하는 것을 목표로 삼고 있다.



1.2 논문 구성

본 논문에서는 고온가스의 온도분포 및 농도분포를 측정할 수 있는 CT-TDLAS법에서 가장 중요한 사안인 실험으로부터 획득한 스펙트럼을 이론상의 스펙트럼으로 재현하는 알고리즘들의 성능비교에 관한 내용을 다루고 있다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적에 대하여 소개하고, 제2장에서는 온도분포 및 농도분포 측정법인 CT-TDLAS 이론에 대하여 기술한다.

제3장에서는 스펙트럼을 재구성함에 있어서 중요한 역할을 하는 스펙트럼 Curve Fitting 알고리즘들에 의한 온도분포 및 농도분포 측정 성능에 관하여 기술한다.

마지막으로 제4장에서는 본 논문의 결론 및 고찰을 정리한다.

제2장 CT-TDLAS 이론

2.1 흡수법(Absorption Methods) 원리

흡수법(absorption method)은 기체분자가 화학종류에 따른 특유 파장의 적외선을 흡수하는 성질과 그 흡수량의 온도와 농도 의존성을 이용한 측정법이다. Fig. 2.1에 입사광이 광로길이의 균일한 흡수매체를 통과할 경우, 입사광과 투과광의 강도비 ($I_i(\lambda)/I_o(\lambda)$)에 의하여 농도 혹은 온도를 측정할 수 있다. 이 관계는 Lambert-Beer 법칙(Deguchi, 2011)이라고 한다.

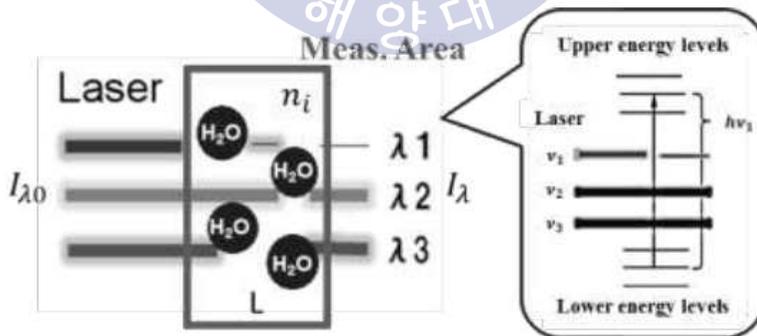


Fig. 2.1 Principle of Lambert-Beer(Deguchi, 2011)

가스원자의 농도에 따라 흡수되는 빛은 지수함수적으로 감소함을 이용한 Beer-Lambert 법칙에서의 입사광과 투과광과의 함수관계는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_t(\lambda)}{I_o(\lambda)} = \exp\{-A_\lambda\} \quad (2.1)$$

$$\frac{I_t(\lambda)}{I_o(\lambda)} = \exp\left\{-\sum_i \left(n_i \cdot P \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) G_{\nu_i,j}\right)\right\} \quad (2.2)$$

$I_o(\lambda)$: 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

여기서 A_λ 는 흡광도, n_i 는 단위 i 에 존재하는 분자수밀도, L 은 광로길이, $S_{i,j}(T)$ 는 단위 i 에서 j 로의 천이할 때 흡수선강도, T 는 온도, $G_{vi,j}$ 는 흡수선의 Broadening 함수인데 일반적으로 Voigt 함수로 표시된다. $S_{i,j}(T)$ 는 가스의 종류, 천이파장과 가스온도에 의존하며, 다음의 식으로 표시될 수 있다(Deguchi; 2011).

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp \left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left[\frac{1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT_0}\right)} \right] \quad (2.3)$$

여기서, h [j·s]는 프랑크 상수, c [cm/s]는 빛의 속도, k [J/K]는 볼츠만 상수, v_0 는 중심파수, E_i'' 는 그 천이에 있어서 저에너지상태를 뜻한다. $Q(T)$ 는 분자의 에너지 상태량에 관계하는 온도에 관한 4차식 분배함수이다(Gamache et al.; 2000).

2.2 선폭확장 함수(Line Broadening Function)

실 프로세스에 있어서 계측되는 흡수스펙트럼은 온도, 압력, 가스성분에 의한 스펙트럼의 선폭확장 현상에 의하여, 그 스펙트럼형상이 변화한다. 이하는 Deguchi(2011)에 의한 선폭확장 현상에 관한 내용을 기술한다. 선폭 확장은 크게 2부류로 나뉜다.

모든 분자에 동일한 영향을 미치는 균일 확장(homogeneous broadening)과 어떤 분자 그룹에 다른 영향을 미치는 불균일 확장(inhomogeneous broadening)이 있다. 균일 확장에는 Natural broadening과 Collisional broadening이 있으며, 불균일 확장에는 Doppler broadening이 있다.

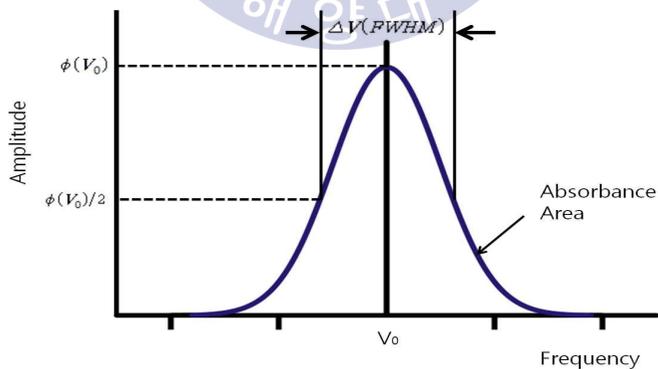


Fig. 2.2 Line broadening function

실제 프로세스에서는 Natural broadening에 의한 스펙트럼에의 영향은 적고, Collisional broadening과 Doppler broadening이 지배적이다. Fig. 2.2는 실제 프로세서상에서의 선폭확장 함수의 형상을 나타낸다.

(1) Lorentz 선상 함수

자연적인 흡수가스에 의한 선폭 넓어짐과 분자들의 운동에 의해 발생하는 분자 상호간의 충돌에 의한 선폭 넓어짐(collisional broadening)은 균일한 선폭 넓어짐과 선폭의 증가를 보인다. 이러한 선폭의 변화는 다음 식(2.4)의 Lorentz 선형함수로서 표현되어지며, Heigenberg 불확실 이론에 의해 설명 가능하다.

$$\Delta V \geq \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.4)$$

광자(Photon) 에너지는 흥분된 상태에서의 제한된 시간 때문에 정확히 알 수 없다. 그러나 흡수 천이(Absorption transition)의 에너지 상태가 자연적인 수명에 의해서 감소된다면, 자연적 선폭 넓어짐(Natural broadening)으로서 선폭의 변화를 나타낼 수 있다. 자연적인 선폭 넓어짐

은 Lorentzian 선형 함수로서 표현 가능 하다.

$$\Phi_n(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta\nu_n}{2}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_n}{2}\right)^2} \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 $\Delta\nu_n [cm^{-1}]$ 은 “natural” 선폭 (FWHM)이며, $\nu_0 [cm^{-1}]$ 는 중심 주파수(line center frequency)를 나타낸다. 대부분의 경우에는 이러한 자연적 선폭 넓어짐(Natural broadening)은 비교적 긴 에너지 준위의 수명으로 인해 무시 가능하다. 충돌에 의한 선폭확장(Collisional broadening)은 중요한 균일한 선폭확장 현상이다. Collisional 선폭확장은 분자들 간의 상호충돌에 의해 발생되며, 주로 이원자 분자에서 발생된다. 충돌의 존속 시간에 대한 선폭의 변화는 무시된다. 이러한 선형함수는 다음 식 (2.6)과 같이 Lorentzian profile에 의해 나타낼 수 있다.

$$\Phi_c(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta\nu_c}{2}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2} \quad (2.6)$$

(2) Doppler broadening

Doppler broadening은 흡수가스 분자의 불규칙적인 열운동에 의하여 발생하는 현상으로서, 흡수가스 분자의 속도분산은 평형통계역학으로부터 유도되는 Maxwell식을 따르게 된다. 따라서 Doppler broadening의 형상은 다음의 Gaussian 함수 식(2.7)로 정의될 수 있다.

$$G_D(\nu) = \frac{c}{\nu_0} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_D^2}\right] \quad (2.7)$$

(이때, $\Delta\nu_D = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2\ln 2 \cdot kT}{m}}$)

여기서 $\Delta\nu_D$ 는 Doppler의 반폭값, ν_0 는 중심선주파수, m 은 흡수가스의 분자량이다. Doppler의 반폭값은 중심주파수와 가스온도의 평방근에 비례하고, 흡수가스의 분자량에 반비례한다. 가스온도가 클수록 $\Delta\nu_D$ 도 크게 되어, 선폭확장(broadening)의 영향이 크게 된다. 또한 Lorentz함수의 최대값은 다음 식(2.8)로 나타낼 수 있다.

$$G_D(\nu_0) = \frac{2}{\Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \quad (2.8)$$

(3) Collisional broadening

Collisional broadening은 어떤 발광 혹은 흡수가스 분자와 다른 분자와의 충돌에 의하여 발생하는 현상으로, 불확정성 원리에 의하여 설명된다. 그들의 같은 종류 혹은 다른 종류의 가스분자들끼리 충돌발생 회수가 많을수록 어떤 에너지 레벨에 존재하는 시간은 짧게 되어 그 천이는 확대된다. 그 결과로서 Collisional broadening 형상은 Lorentz함수에 의하여 다음의 식(2.9)로 정의된다.

$$G_C(\nu) = \frac{\Delta\nu_C}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_C}{2}\right)^2} \quad (2.9)$$

여기서, $\Delta\nu_C$ 는 Collisional의 반폭값, ν_0 는 중심선주파수이다. 다른 화학종 분자들끼리의 충돌에 있어서 2종 이내이라면 Collisional 반폭값은 일정온도에 있어서 압력에 비례하고, 다성분의 경우에는 반폭값은 다음 식 (2.10)으로 정의 된다.

$$\Delta\nu_C = 2P\epsilon = P\sum_i x_i(2\epsilon_i) \quad (2.10)$$

$$\left(\text{이때, } \epsilon_i(T) = \epsilon_i(T_0) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_i} \right)$$

여기서 ϵ_i 는 I번째 성분의 유입 교란에 따른 Collisional broadening계수, T_0 는 기준온도, n_i 는 온도의존 계수이다. 또한 Lorentz함수의 최대값은 다음 식 (2.11)로 나타난다.

$$G_C(\nu_0) = \frac{2}{\Delta\nu_c\pi} \tag{2.11}$$



2.3 재구성 알고리즘

(1) CT-TDLAS에 의한 온도분포, 농도분포 계산 과정

Fig. 2.3은 엔진배기관에 설치된 CT-TDLAS를 이용한 온도분포 및 농도분포 측정장치의 사례(Deguchi, 2012)를 나타낸다. 그림에서 열전대(thermocouple)가 설치되어 있는 부분을 위에서 봤을 때의 모습이 Fig. 2.4이다. 그림에서 DFB laser에서 나온 레이저광은 beam splitter에 의하여 여러 가닥의 광원으로 나누어지게 된다. 이어서 Collimator에 의하여 광초점을 모아서 배기가스가 통과하는 측정부위를 통과하게 되면 반대편의 검출부(detector)에서 여러 가닥의 신호가 얻어지게 된다.

Fig. 2.5는 여러 가닥의 입사광 신호가 측정부위를 통과하여 그 반대편에서 얻어진 Fig. 2.6과 같은 흡수스펙트럼이 나타나 있는 것을 보인다. 온도분포와 농도분포는 Fig. 2.5상에서 레이저광들이 교차하는 곳(격자상)에서 구하게 된다. 다시 말하면, 5개 x 5개의 레이저광이 교차할 경우, 총 25개의 격자상에서의 온도와 농도가 구해지게 된다. 그런데, 총 온도 25개와 농도 25개를 구해야하는데 실험에서 실질적으로 얻을 수 있는 신호는 10개밖에 없다. 따라서 이 10개의 흡수스펙트럼 신호만을 가지고 내부의 25개 격자상에서 온도와 농도를 계산하기 위하여 토모그래피 계산(computed tomograph)을 수행하게 된다.

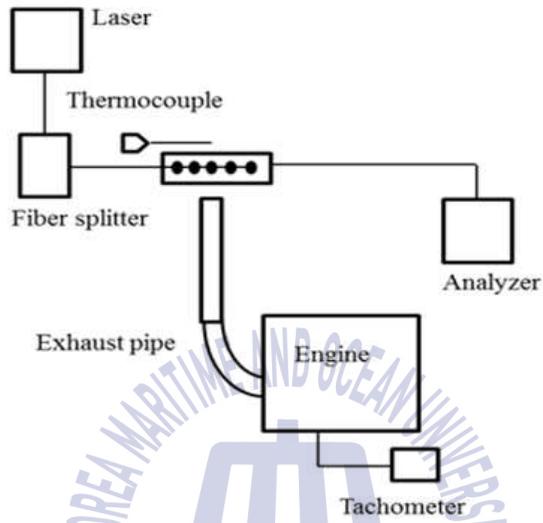


Fig. 2.3 Line broadening function

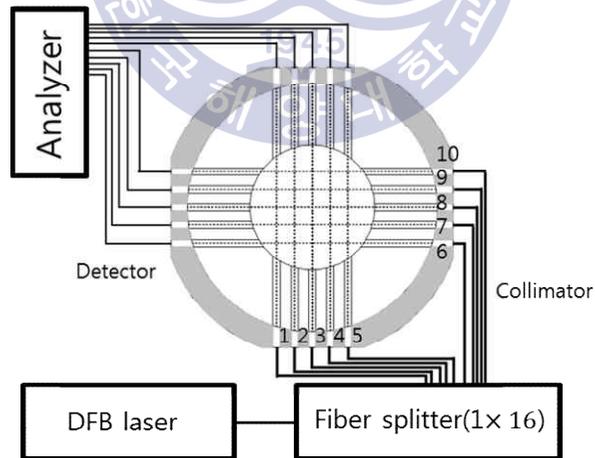


Fig. 2.4 Measurement apparatus

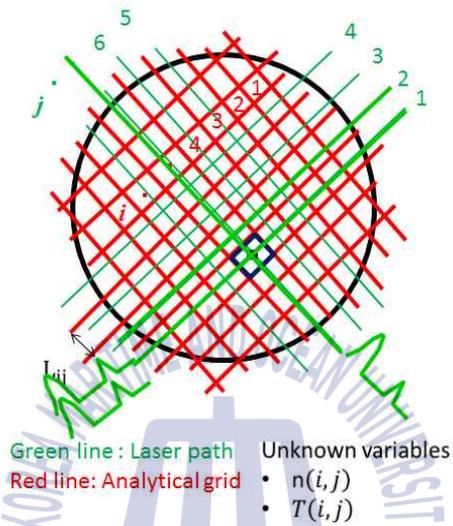


Fig. 2.5 Measurement apparatus

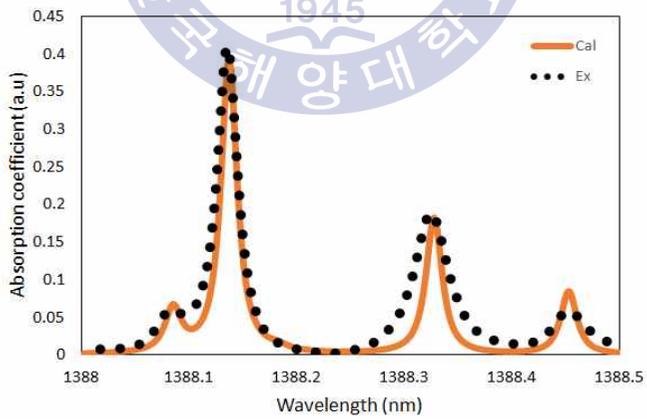


Fig. 2.6 Spectra of absorption coefficients

(2) CT-TDLAS에서의 토모그래피 계산(재구성 알고리즘)

Fig. 2.7은 CT-TDLAS법에서 온도분포와 농도분포를 계산하기 위한 흐름도를 나타낸다. 이하는 최종 온도분포와 농도분포를 얻기까지의 반복계산 알고리즘에 대하여 기술한다.

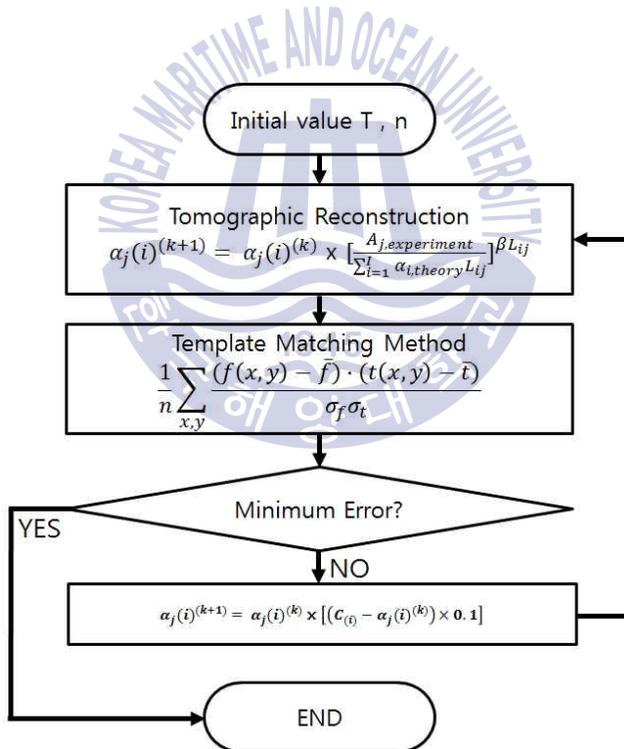


Fig. 2.7 Flows of iterative calculations

본 연구에서는 반복계산 알고리즘으로서 편차를 곱셈 수정벡터로 하는 MART(multiplicative algebraic reconstruction technique)법을 적용하였다. 본 연구에서는 측정가스로서 수증기(H₂O)를 대상으로 하였다. 가스 원자에 흡수되는 흡수광은 Beer-Lambert법칙에 의하여 아래 식 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_t(\lambda)}{I_o(\lambda)} = \exp\{-\alpha_\lambda\} \quad (2.12)$$

여기서, α_λ 는 가스의 농도와 온도의 함수로 나타나는 흡수계수(absorption coefficient)이다. α_λ 는 다음 식 (2.13)과 같이 농도와 온도의 함수로 나타난다.

$$\alpha_\lambda = \sum_i \left(n_i \cdot P \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) G_{vi,j} \right) \quad (2.13)$$

여기서, n_i 는 가스의 수밀도, P는 압력, L은 투과되는 빛의 길이, $S_{i,j}(T)$ 는 Table 2.5.2의 HITRAN(high-resolution transmission molecular absorption, Stanford대에서 제공하고 있음) 데이터베이스로부터 구해지는 선강도(line strength)이며 온도의 함수이다. $G_{vi,j}$ 는 광원의 형상 함수이다. 한편, 식 (2.13)은 다음 식 (2.14)와 같이 빛의 흡수량으로 나타

낼 수 있다.

$$A_{v1,j} = \sum_{i=1}^I [P \cdot X \cdot S(T)]_{v1,i} L_{ij} \quad (2.14)$$

이어서, 다음 식 (2.15)를 이용하여 식 (2.13)의 흡수계수를 Fig. 2.5의 격자상에 대하여 구할 수 있게 된다.

$$\alpha_j(i)^{(k+1)} = \alpha_j(i)^{(k)} \times \left[\frac{A_{j, \text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{i, \text{theory}} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (2.15)$$

이와 같이 각 격자상의 초기 농도와 온도분포, $n(i,j)$ 와 $T(i,j)$ 가 구해지면 Fig. 2.6과 같이 실험장치의 검출부(detector)에서 측정된 흡수광 신호(Fig. 2.8은 측정된 10개의 흡수광의 스펙트럼 사례를 나타낸다.)가 이론값과 거의 동일한 값을 가질 때까지 반복계산을 수행한다. 즉,

$(A_{v1,j})_{\text{theory}} = \sum_{i=1}^I \alpha_{i, \text{theory}} L_{ij}$ 인 이론에 의한 흡수량(HITRAN 데이터로부터 계산됨)과 실험에 의하여 얻어진 흡수량이 같아질 때까지 반복계산을 수행하면 최종적인 농도와 온도분포, $n(i,j)$ 와 $T(i,j)$ 를 구할 수 있게 된다.

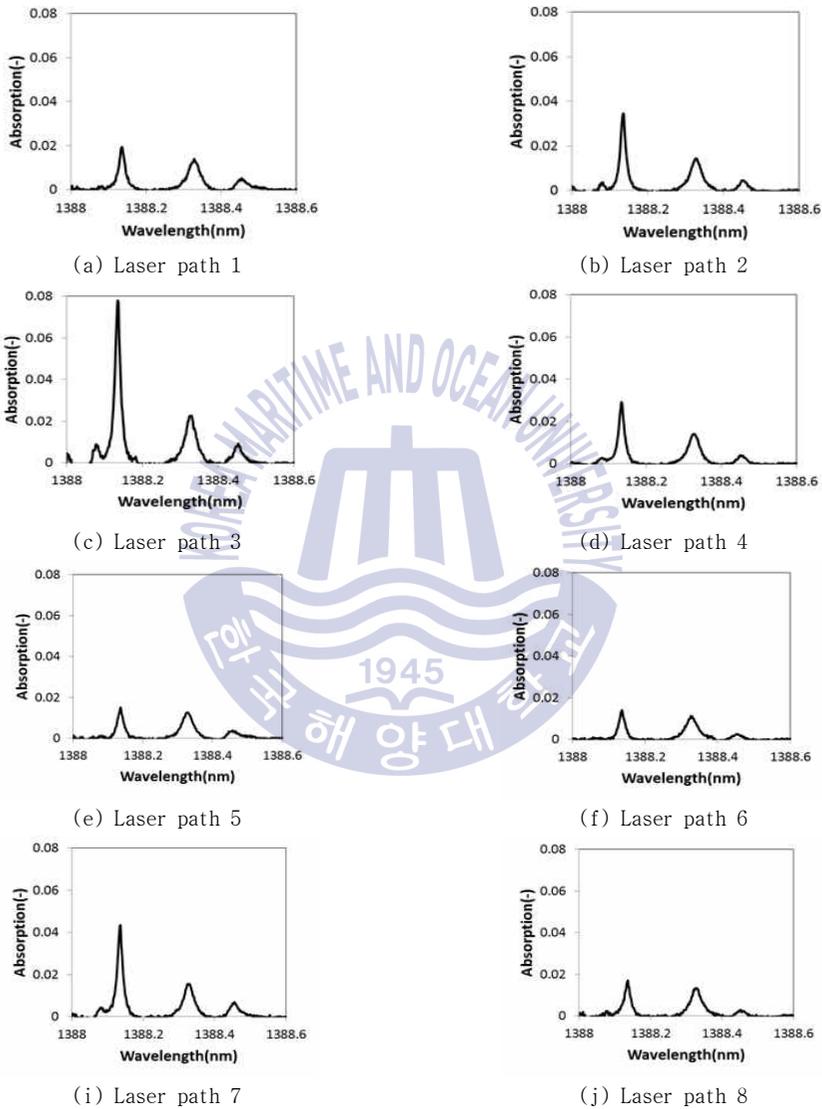


Fig. 2.8 Spectra of H₂O for 8 laser paths at temperature = 300K

가상데이터(phantom data) 흡수량과 계산된 흡수량의 편차가 최소가 되어 수렴할 때까지 반복적으로 계산하는 방법으로 식 (2.15)를 사용하였다. β 값은 0~1 사이의 값을 가지는데, 본 논문에서는 Choi et al.(2014)의 연구의 결과로서 밝힌 최적화된 β 값으로 0.1을 이용하였다. 가로레이저와 세로레이저 순번으로 계산을 실시하며, 새로운 흡수계수 $a(i)^{k+1}$ 값으로 갱신되면 다시 템플릿 매칭을 이용해 새로운 온도값과 농도값을 얻었다. 이와 같은 방법으로 계산된 흡수량에 팬텀데이터의 흡수량이 수렴할 때까지 반복 계산하여 오차가 최소일 때의 온도값과 농도값을 구하였다. 한편, HITRAN 데이터베이스를 이용하여 선강도 계산에는 식 (2.3)을 이용하였고, 분배함수 $Q(T)$ 는 다음 식 (2.16)을 이용하였다.

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (2.16)$$

위 식에서 온도(T)는 다음 식 (2.17)로부터 구할 수 있다.

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_1'' - E_2'')}{R - \ln \frac{S(T_0, v_2)}{S(T_0, v_1)} + \frac{hc}{k} \left(\frac{E_1'' - E_2''}{T_0} \right)} \quad (2.17)$$

이때, 에너지레벨 E_i'' 와 참조온도 T_0 에 있어서의 $S_i(T)$ 의 값은 전술한 HITRAN Database(Stanford 대 온라인 제공)로부터 얻어진다.

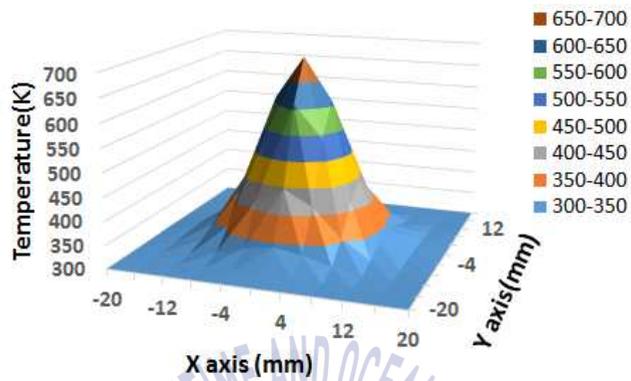
제3장 Spectra Curve Fitting 알고리즘 성능평가

3.1 가상데이터 결과

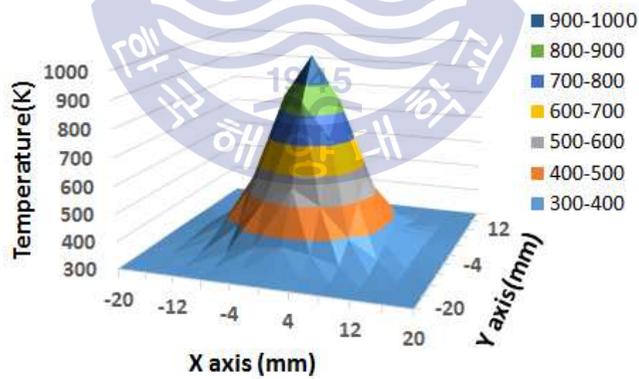
본 장에서는 가로 11paths, 세로 11paths의 가상(Phantom) 온도분포와 농도분포를 이용하여 1388nm 파장대의 H₂O 흡수스펙트럼-흡수량 그래프를 만들고 각각의 Curve fitting 법을 적용하여 온도분포와 농도분포를 재구성하였다. 그리고 그 측정 결과를 이용하여 각각의 재구성데이터에 대한 성능평가를 실시해보았다. 가상(Phantom)의 온도데이터는 식 (3.1.1)의 가우시안 분포(gaussian distribution)를 이용하여 생성하였고, 여기서 B는 최대 온도값, T₀는 최저온도이며 $\sigma = 2$ 를 사용하였다.

$$T_{i,j} = B \exp[-(i^2 + j^2)/\sigma^2] + T_0 \quad (3.1.1)$$

가상 온도분포결과는 Figure 3.1.1에 그 결과를 보여주고 있으며 소형 엔진의 원형 배기구로 배출되는 가스의 온도의 케이스를 저온부, 고온부 2개로 나누어 모델링하였으며 외곽온도는 300K이라 가정하였다. 저온부 온도분포의 범위는 300K ~ 700K이고, 고온부 온도분포의 범위는 300K ~ 1000K 이다. Figure 3.1.2는 농도장 결과를 보여주며 저온부에서의 농도 범위는 0.02 ~ 0.14이고 고온부에서는 0.02 ~ 0.18로 나타난다.

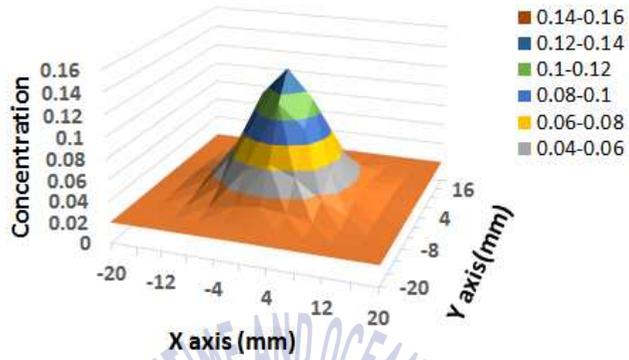


(a) Virtual temperature distribution at low temperature

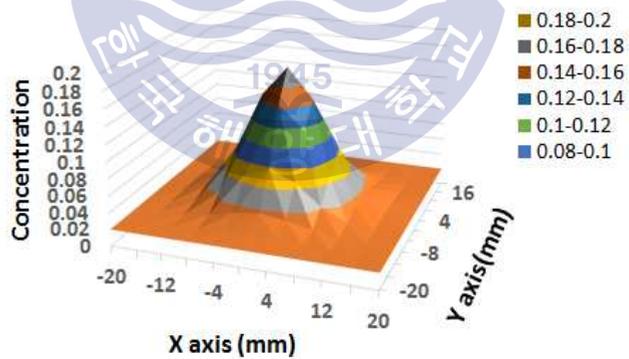


(b) Virtual temperature distribution at high temperature

Figure 3.1.1 Generated virtual temperature distribution



(b) Virtual concentration distribution at low temperature



(b) Virtual temperature distribution at high temperature

Figure 3.1.2 Generated virtual concentration distribution

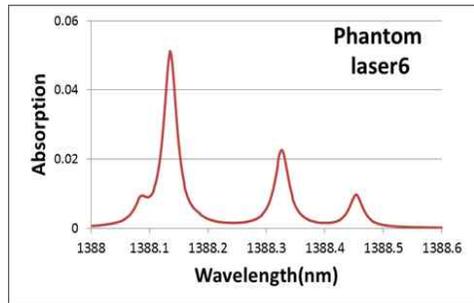
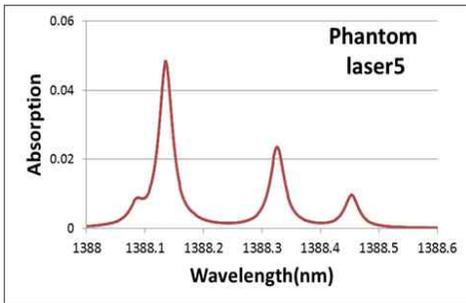
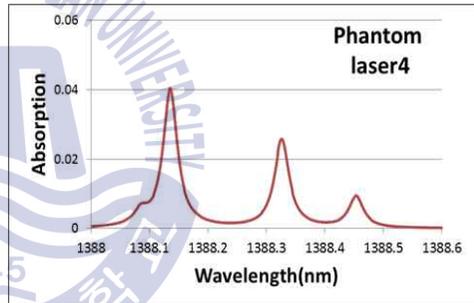
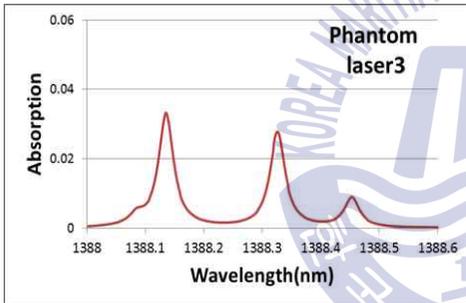
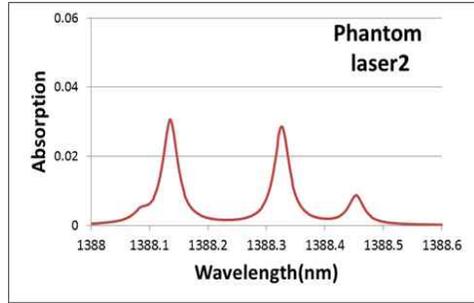
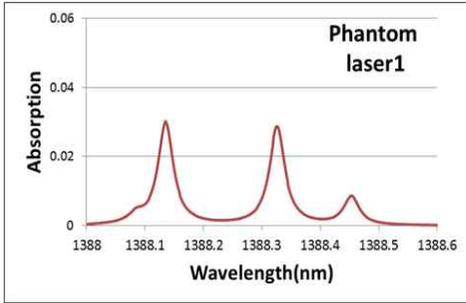
가상의 레이저 흡수값은 식 (3.1.2)과 식(3.1.3)을 이용하여 계산하였고 저온부 결과는 Figure 3.1.3 과 같고 고온부의 결과는 Figure 3.1.4와 같다. 저온부와 고온부의 흡수스펙트럼 결과에서 보이는 것과 같이 측정영역의 중심부인 6번 Path와 17번 Path에서 첫 peak point가 가장자리의 흡수데이터보다 큰 값을 보이는 것을 확인하였고 주어진 가상의 가우시안 분포에 따라 좌우 흡수선 그래프는 대칭 인 것을 알 수 있었다.

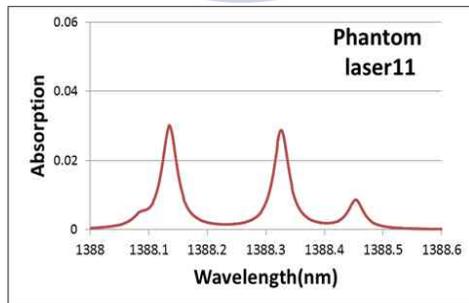
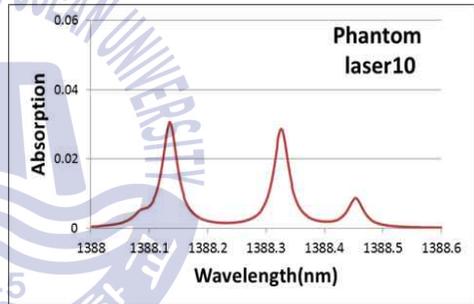
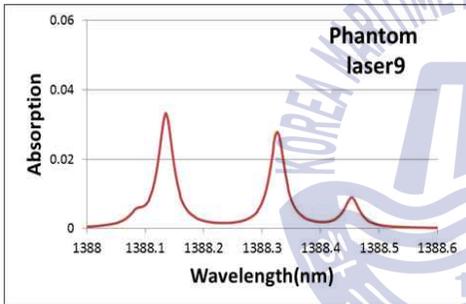
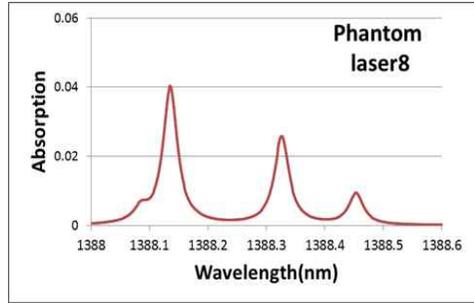
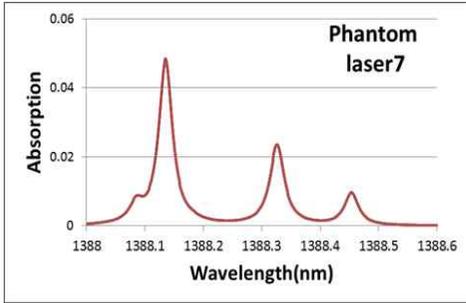
$$\frac{I_t(\lambda)}{I_o(\lambda)} = \exp\{-\alpha_\lambda\}$$

$$\frac{I_t(\lambda)}{I_o(\lambda)} = \exp\left\{-\sum_i \left(n_i \cdot P \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) G_{V_{i,j}} \right) \right\} \quad (3.1.2)$$

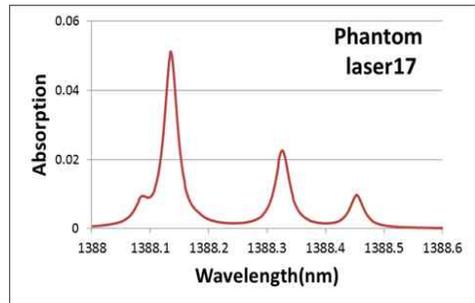
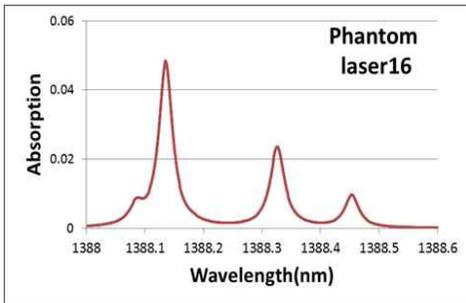
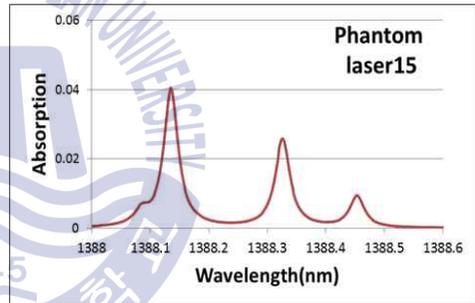
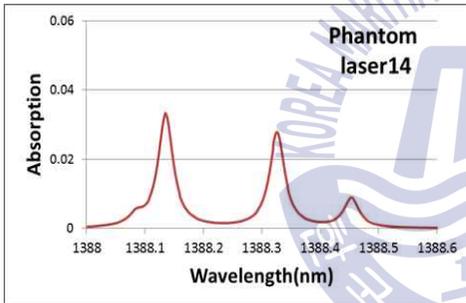
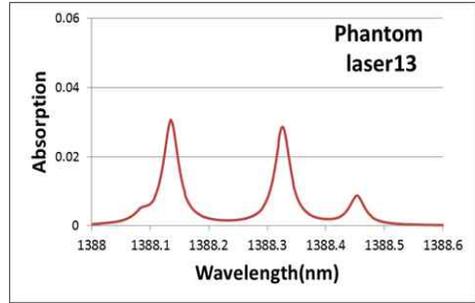
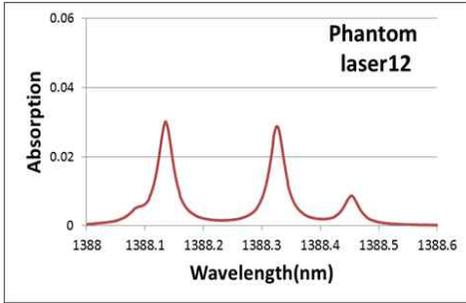
$$S_i(T) = S_i(T_0) \cdot \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \cdot \left(\frac{T_0}{T} \right)$$

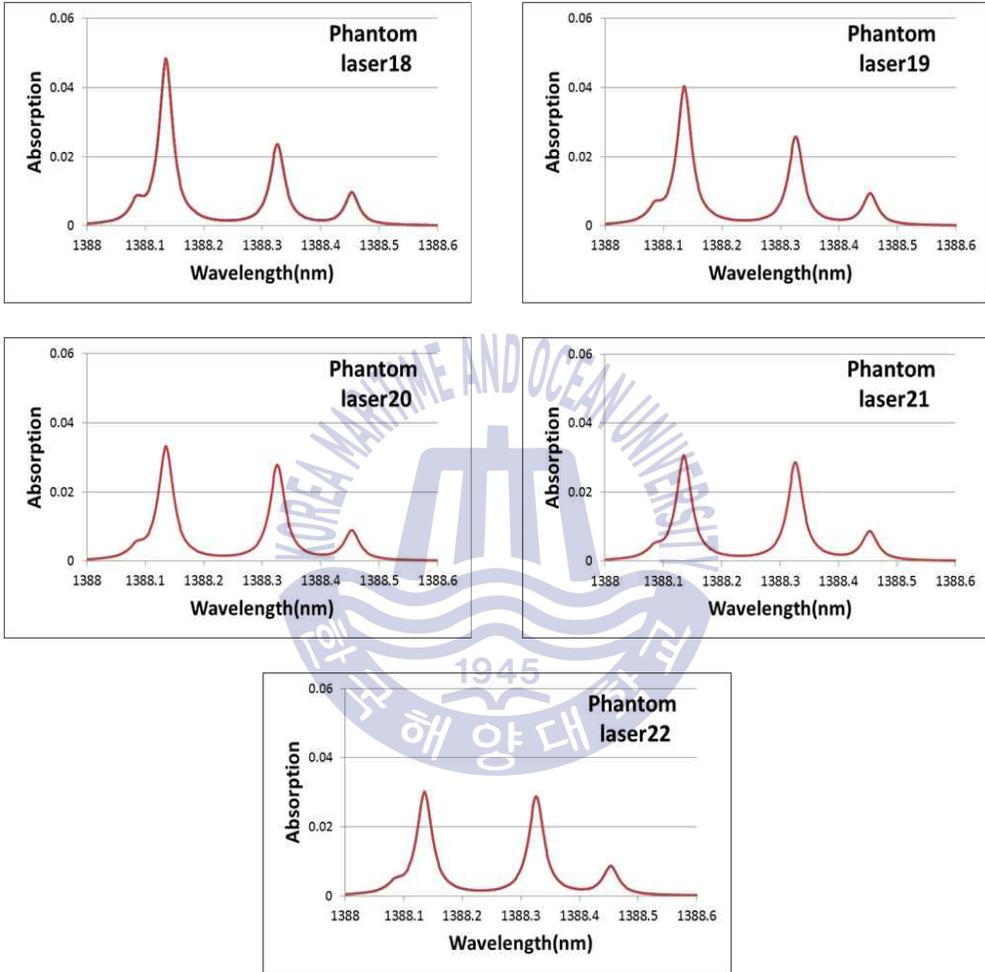
$$\cdot \exp \left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \cdot \left(\frac{1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT_0}\right)} \right) \quad (3.1.3)$$





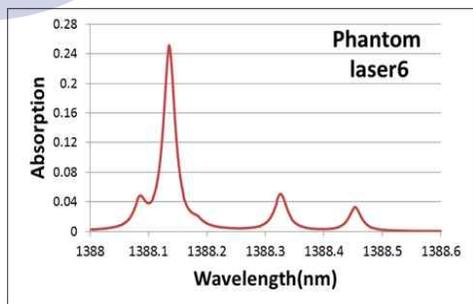
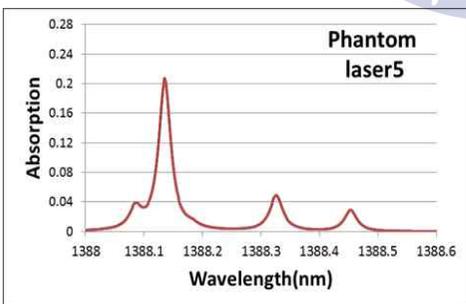
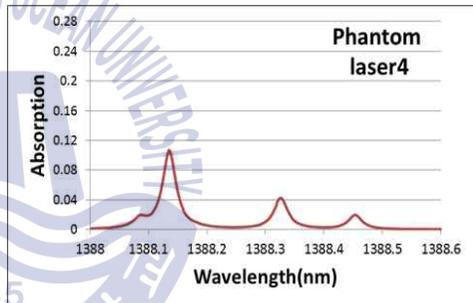
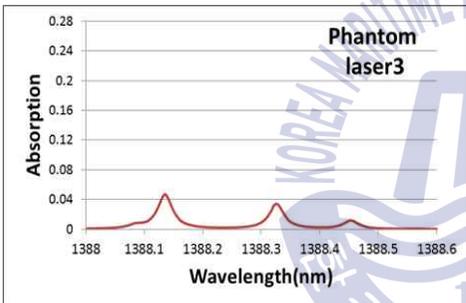
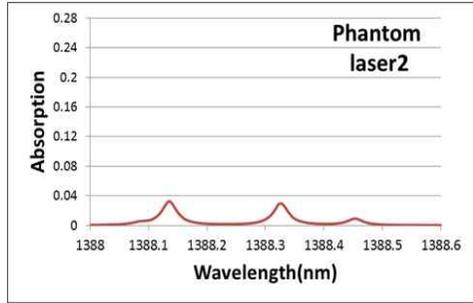
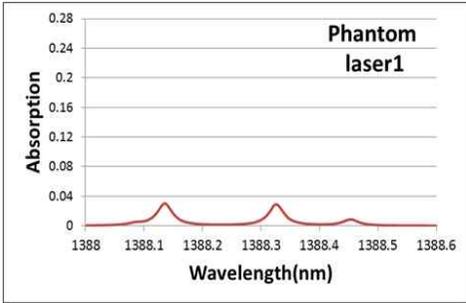
(a) The phantom absorption graphs of horizontal lasers of H₂O spectrum at 1388.0 ~ 1388.6 nm

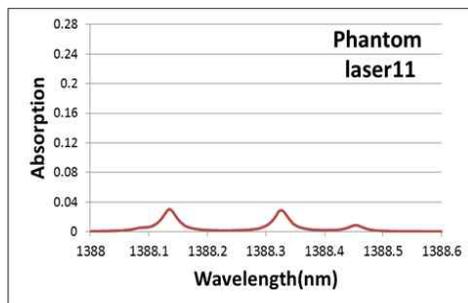
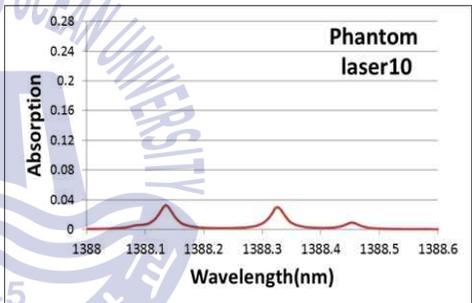
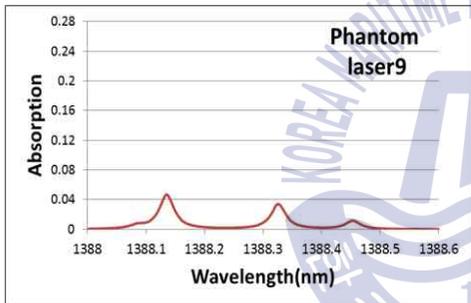
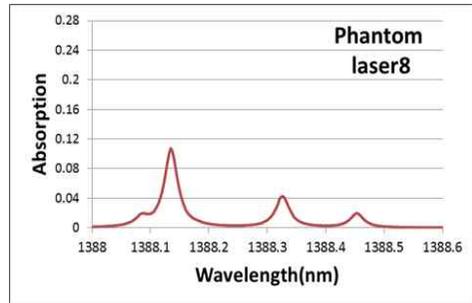
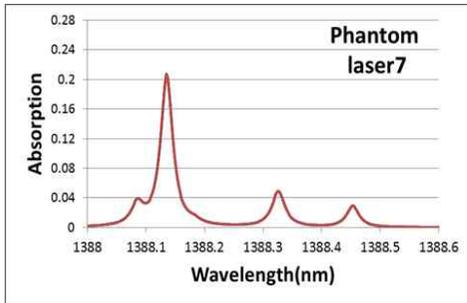




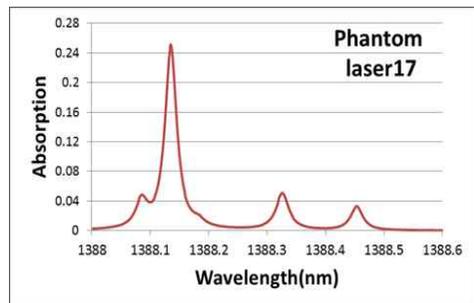
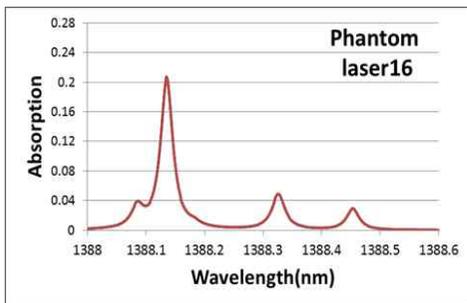
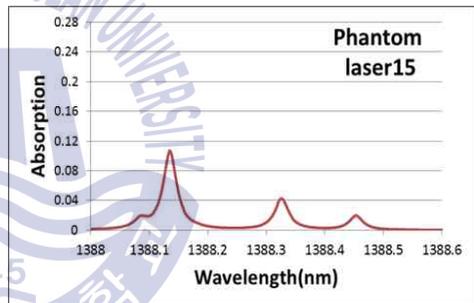
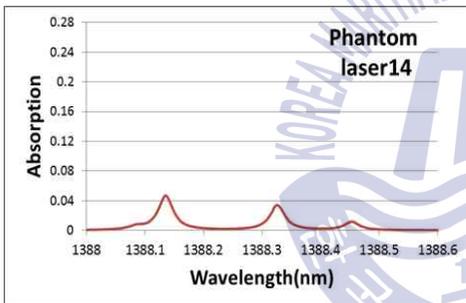
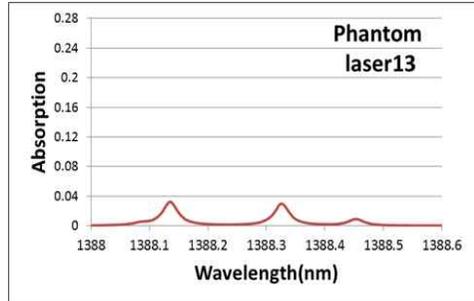
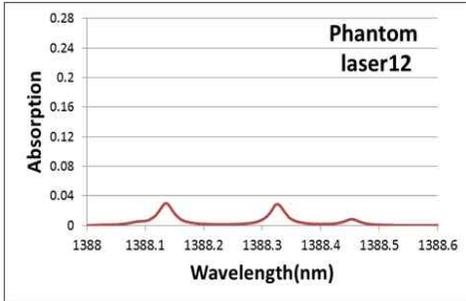
(b) The phantom absorption graphs of vertical lasers of H₂O spectrum at 1338.0 ~ 1338.6 nm

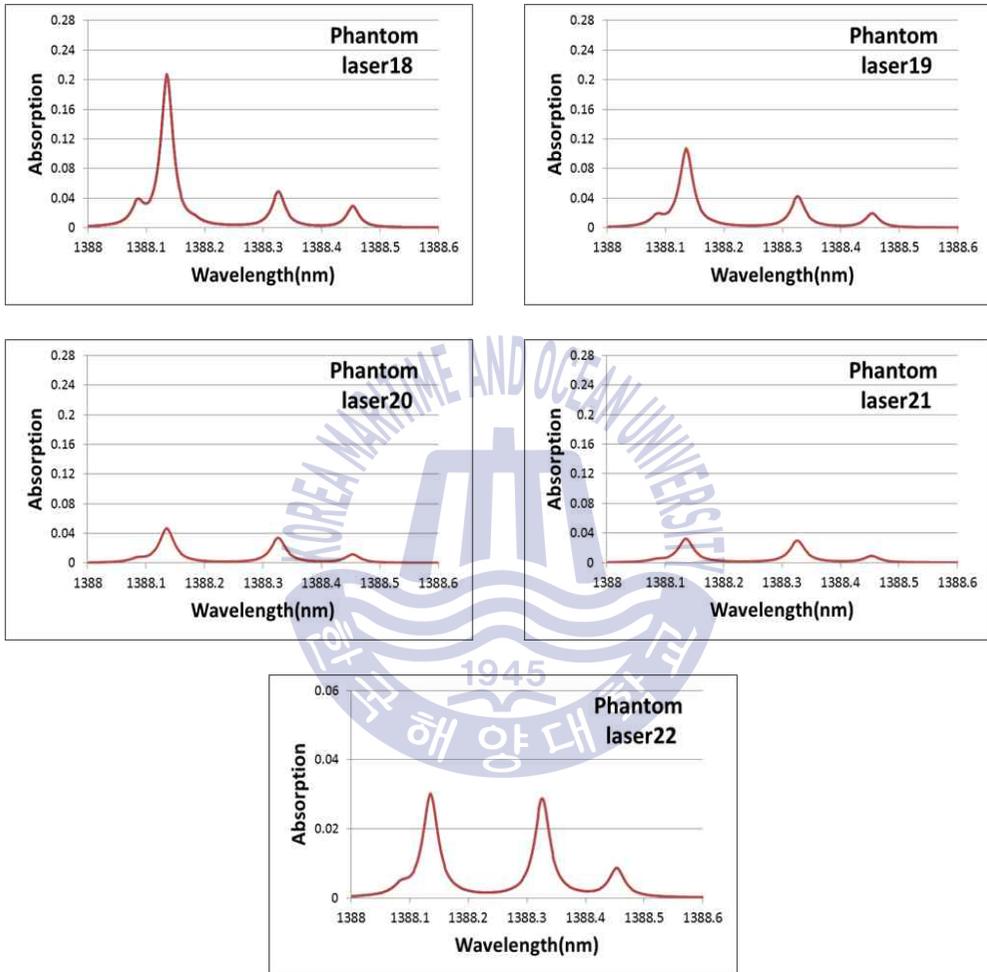
Figure 3.1.3 The Phantom absorption graphs at low temperature





(a) The phantom absorption graphs of horizontal lasers of H₂O spectrum at 1338.0 ~ 1338.6 nm





(b) The phantom absorption graphs of vertical lasers of H₂O spectrum at 1388.0 ~ 1388.6 nm

Figure 3.1.4 The Phantom absorption graphs at high temperature

3.2 One-ratio-two-peaks curve fitting 법

CT-TDLAS 해석에서 온도 산정 알고리즘은 두 파장의 최대 흡수량 값의 비를 이용해 온도를 찾는 방식이 사용한다. 본 절에서는 가상레이저의 데이터를 이용하여 기존의 두 파장 #1, #2을 이용하는 방식인 One-ratio-two-peaks를 적용하여 Figure 3.2.1을 통하여 온도를 산정하였다.

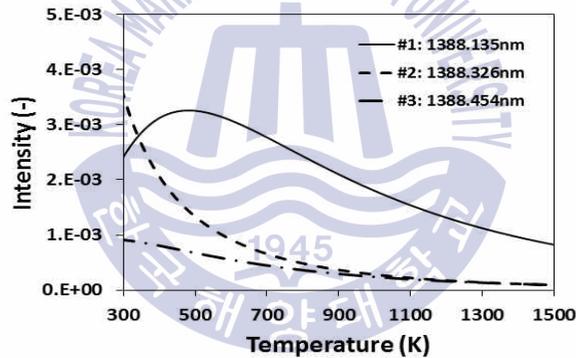
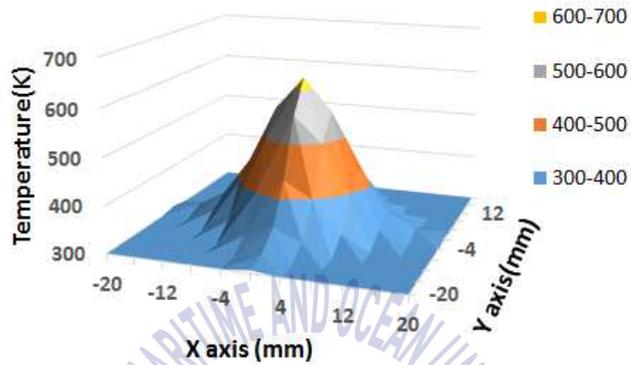


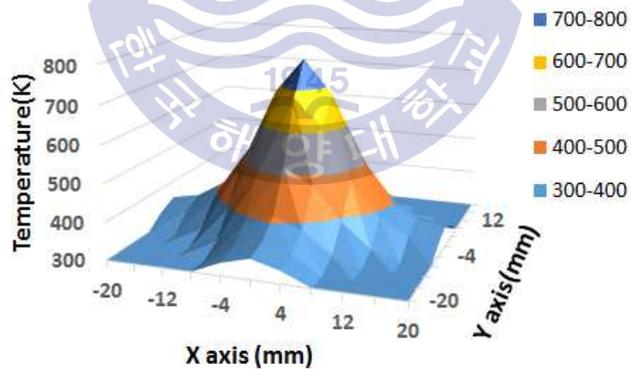
Figure 3.2.1 Temperature dependence of three lines

Figure 3.2.2는 두 파장 이용방식과 One-ratio-two-peak 알고리즘을 적용하여 저온부와 고온부의 온도를 재구성한 결과이다. 저온부에서의 온도오차 범위는 $-9.8\text{K} \sim 76.7\text{K}$ 이고 고온부에서의 온도오차범위는 $-54.8\text{K} \sim 226.4\text{K}$ 로 나타났다. Figure 3.3.3은 저온부와 고온부에서의 농도분포를 나타내며 저온부에서의 오차범위는 $0.013 \sim 0.051$, 고온부에서의 오차범

위는 0.016 ~ 0.07로 나타났다.

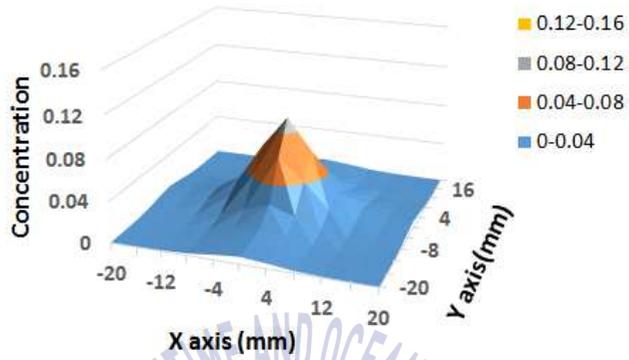


(a) Reconstructed 2D temperature distribution at low temperature

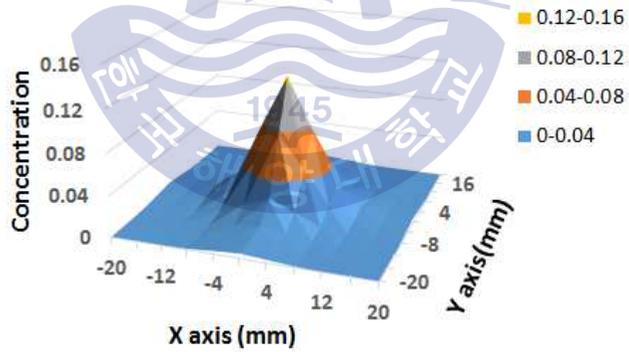


(b) Reconstructed 2D temperature distribution at high temperature

Figure 3.3.2 Reconstructed 2D temperature distribution using one-ratio-two-peaks algorithm



(a) Reconstructed 2D temperature distribution at low temperature



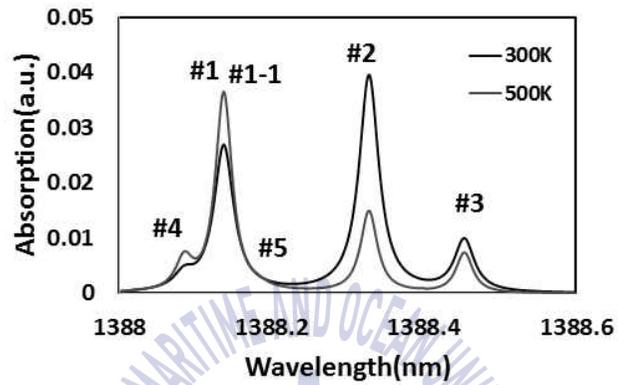
(b) Reconstructed 2D temperature distribution at high temperature

Figure 3.3.3 Reconstructed 2D concentration distribution using one-ratio-two-peaks

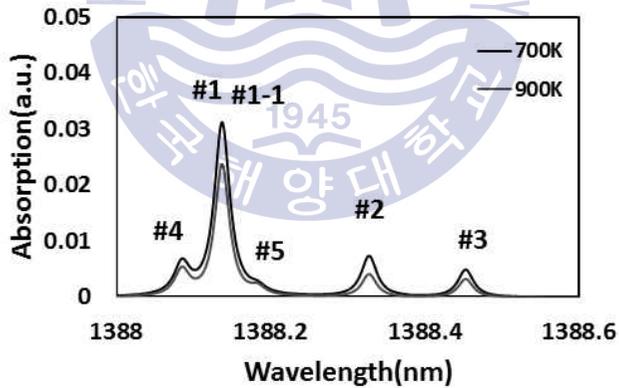
3.3 Two-ratios-three-peaks curve fitting 법

본 절에서는 기존의 One-ratio-two-peaks에서 변환되는 온도의 정보를 더 많이 줄 수 있는 세과장을 이용하는 방식인 Two-ratios-three-peaks 알고리즘을 사용하여 온도분포와 농도분포를 재구성하였다. 기존의 두 과장 이용방식은 흡수스펙트럼의 #1, #2를 이용하여 Figure 3.2.1로부터 온도데이터를 산출하지만, Two-ratios-three-peaks 방식은 #1, #2, #3 과장에서 #1/#2와 #1/#3의 흡수량의 비를 구하여 Figure 3.3.2를 이용하여 각각 온도를 구하여 평균온도를 찾는 방식이다. 이 방식을 이용하면 반복 계산을 통해 온도로 변환 될 때, 큰 오차로 인해 발산하는 오류를 줄여주어 안정적인 계산을 가능하게 한다. Figure 3.3.1 (a), (b)는 선정된 과장을 이용해 만들어진 흡수스펙트럼 곡선이다. #1~#5은 대표과장을 나타내고 있으며, 대표과장에서 흡수선의 강도가 높음을 알 수 있다. 그 중에서도 흡수강도가 높은 #1 (#1+#1-1), #2, #3 세 과장의 온도에 따른 선강도 곡선을 Figure 3.3.2 에서 보여주고 있다. Figure 3.3.2은 Figure 3.2.1로부터 만들어진 흡수강도의 비(ratio)이다. 온도에 따라 흡수비가 뚜렷하게 나타나는 #1/#2, #1/#3는 재구성 알고리즘 계산에서 흡수량을 온도로 환산하는 중요한 정보를 제공한다. 2차원 배열의 레이저 빔들은 가스의 단면 전체(흡수매체)에 걸쳐서 배치되는데, 이들 배열의 교차점이 해석단위 셀(cell)이 된다. 셀 영역을 지나가는 레이저 빔의 흡수량은 식 (3.3.1)으로 구하였다.

$$A_j = \sum_i^I n_{i,j} L_{i,j} \alpha_{i,j} \quad (3.3.1)$$



(a) 300K, 500K, 0.1 Mpa



(b) 700K, 900K, 0.1Mpa

Figure 3.3.1 Graphs of theoretical H₂O absorption spectra

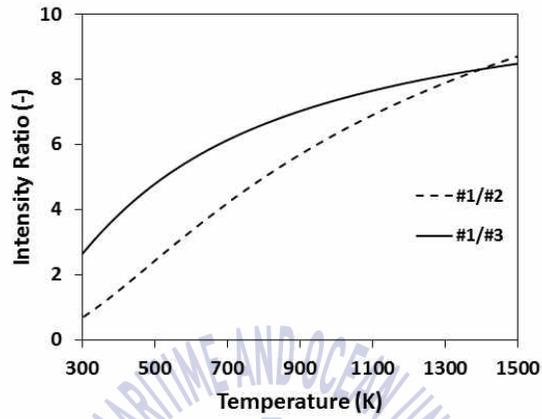
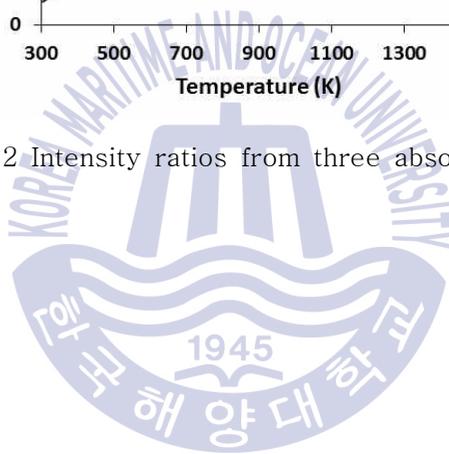


Figure 3.3.2 Intensity ratios from three absorption lines

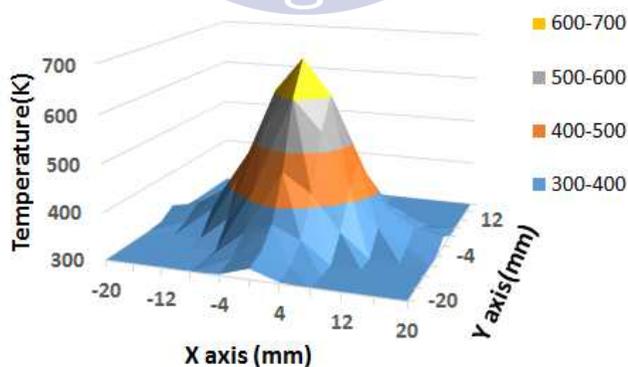


3.3.1 Two-ratios-three-peaks 알고리즘 적용결과

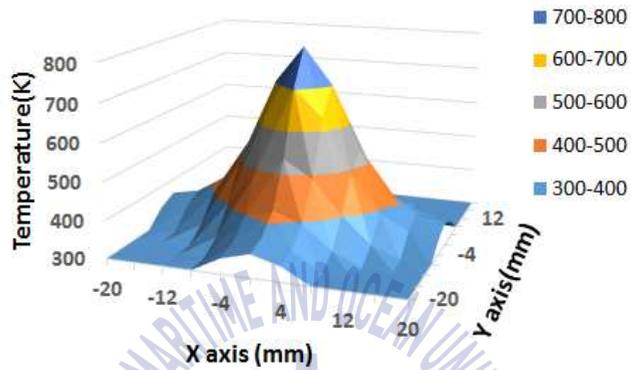
토모그래피 재구성 방법으로 편차를 곱셈 수정벡터로 하며, 수렴속도가 빠른 MART법을 사용하였다. 가상흡수량과 계산된 흡수량의 편차가 0에 가까워지도록 수렴할 때까지 반복 계산하는 방법으로 식 (4) 는 MART법의 알고리즘을 나타낸다.

$$\alpha_{\lambda,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{\lambda,i}(i)^{(k)} \times \left[\frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (3.3.3)$$

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

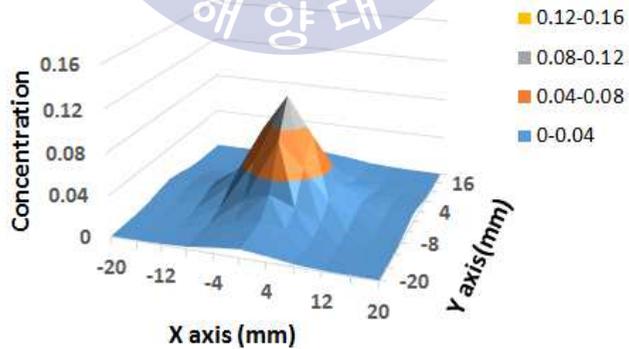


(a) Reconstructed 2D temperature distribution at low temperature

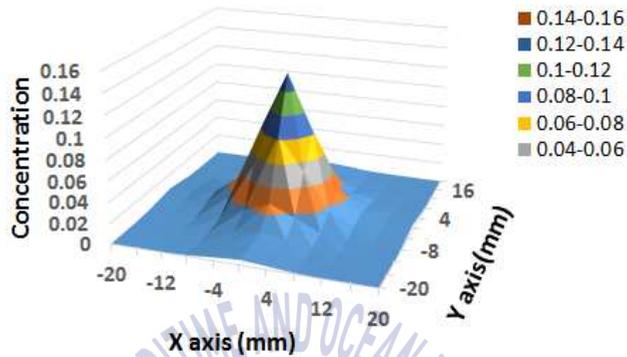


(b) Reconstructed 2D temperature distribution at high temperature

Figure 3.3.3 Reconstructed 2D temperature distribution using two-peaks-three-ratios algorithm



(a) Reconstructed 2D concentration distribution at low temperature



(b)Reconstructed 2D concentration distribution at high temperature

Figure 3.3.4 Reconstructed 2D concentration distribution using two-peaks-three-ratios algorithm

Figure 3.3.3과 Figure 3.3.4는 세 과장 이용 방식과two-ratios-of-three-peaks 알고리즘으로 평균온도 편차가 최소가 될 때, 재구성된 온도, 농도분포의 결과이다. 가상온도장과 재구성된 온도장의 error값들의 범위는 저온부에서는 -29.8K ~ 34.4K, 고온부에서는 -62.9K ~ 200.3K로 나타났다. 가상농도장과 재구성된 농도장의 error값의 범위는 저온부에서는 0.012 ~ 0.04 고온부에서는 0.02 ~ 0.07로 나타났다,

3.4 상호상관법 기반 curve fitting 법

본 절에서는CT-TDLAS의 온도분포 산정을 위해서 상호상관알고리즘 (Cross-Correlation Algorithm)이용하여 온도분포와 농도분포를 재구성하였다. 모든 파장의 흡수강도를 이용하여 Figure 3.4.1과 같이 패턴매칭(Pattern Matching)을 함으로써 온도와 농도를 구하는 방법이다.

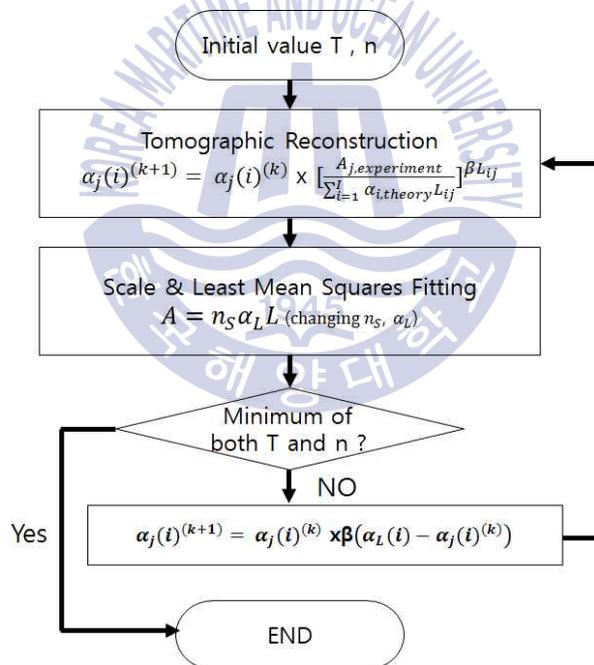
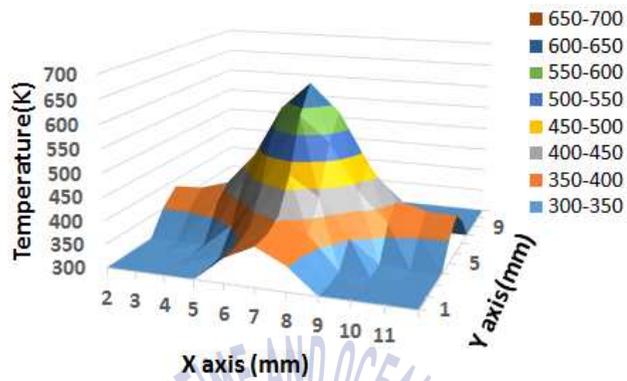


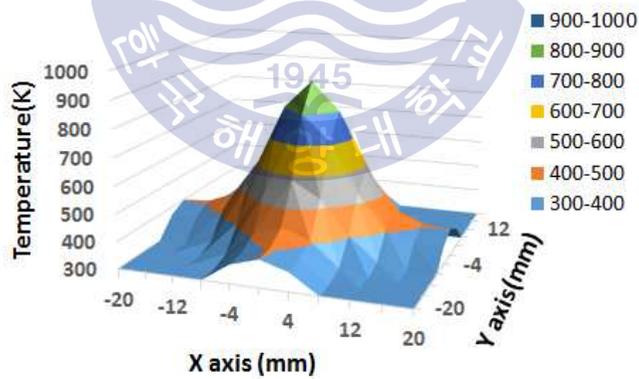
Figure 3.4.1 Flow Chart of pattern matching algorithm

계산된 각 셀(cell)에서의 흡수값으로부터 온도를 구하기 위해, 흡수값 중 최대값을 보이는 두 파장에서의 비를 사용하는 방법(two line thermometry)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 미치게된다. 이러한 오차를 줄이고 계측 정도를 높이기 위해서 보다 많은 파장에서의 정보를 사용하여 온도를 구할 필요가 있다. 본 방법에서는 계측영역내의 레이저의 흡수강도가 높은 몇몇 점을 이용하는 대신에 모든 파장의 흡수값을 사용하여 온도와 농도 계산의 정확성을 향상 시켰다.

Figure 3.4.1은 상호상관 알고리즘을 이용하여 재구현한 온도 분포를 보여주고 있다. 저온부 온도차 범위는 -83K~55K의 범위를 보였으며, 고온부에서는 -99.0K ~ 94.8K의 범위를 가졌다. Figure 3.4.2는 상호상관알고리즘을 이용하여 계산된 재구성 농도분포이다. 저온부 농도오차범위는 -0.015 ~ 0.036이며 고온부에서는 -0.014 ~ 0.04의 농도범위를 가진다.

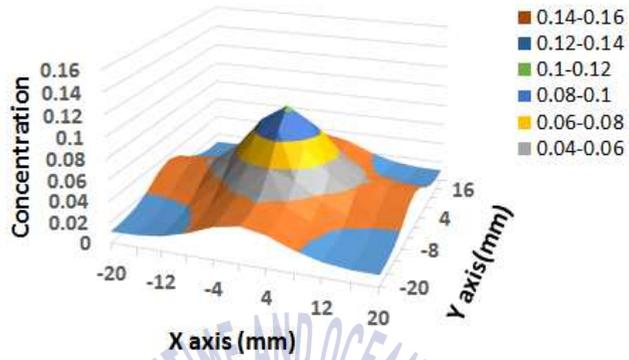


(a) Reconstructed 2D temperature distribution at low temperature cross-correlation curve fitting

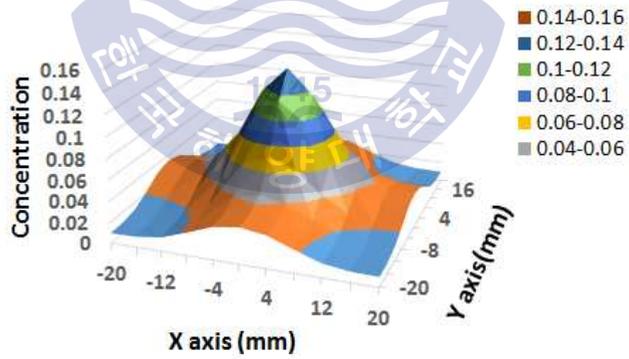


(a) Reconstructed 2D temperature distribution at high temperature cross-correlation curve fitting

Figure. 3.4.1 Reconstruction Temperature distribution



(a) Reconstructed 2D concentration distribution at low temperature cross-correlation curve fitting



(b) Reconstructed 2D concentration distribution at high temperature cross-correlation curve fitting

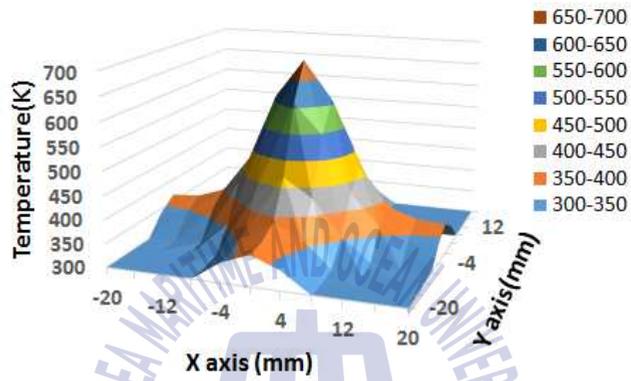
Figure. 3.4.2 Reconstruction concentration distribution

3.5 six-peaks curve fitting 법

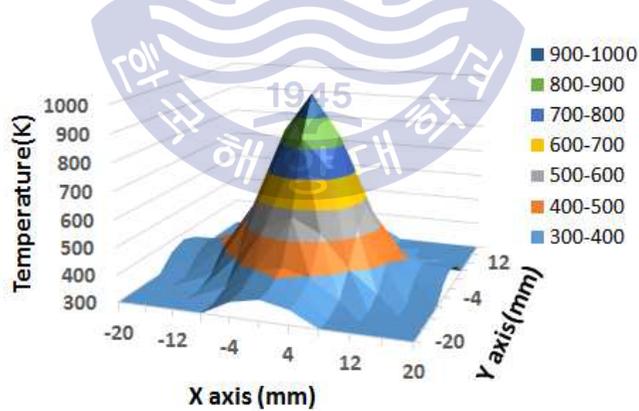
모든 파장에서 피팅을 하는 경우 불필요한 파장의 정보를 사용하게 되는데 이 때 고온부 측정의 오차가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 절에서는 H_2O 의 대표파장 6개를 선정하고 이를 이용하여 온도장과 농도장을 측정한다.

측정된 모든 셀들의 흡수량을 이용하여 온도장과 농도장으로 재구성하기 위해서 HIRTRAN2008 database로 부터 농도 1.0을 기준으로 하여 270~1500K까지의 흡수스펙트럼 분포 그래프 테이블을 이용하였다. 이 테이블 값들은 최적화 커브피팅을 위한 중요한 참고자료가 된다. 농도 ($n_{i,j}$)와 흡수계수 ($\alpha_{i,j}$)의 값을 가지고 있는 각각의 셀들은 흡수스펙트럼 그래프의 형태로 나타낼 수 있다. 이 그래프와 만들어진 테이블과 가장 일치하는 그래프를 찾게기 위해 다음의 피팅기법을 이용한다. 최적화 커브피팅은 농도에 관여하는 스케일 피팅(scale fitting)과 온도에 관여하는 LMS(Least Mean Squares) 커브피팅이 동시에 사용된다. 참고 테이블은 농도 1.0을 기준으로 한 온도함수이기 때문에 각 셀의 농도에 해당되는 크기로 스케일 피팅을 할 필요가 있다. 또한 스케일 피팅과 동시에 6점에서의 LMS 커브피팅을 함으로 셀의 흡수그래프와 가장 일치하는 스펙트럼 그래프 형상을 찾을 수가 있다. 최종적으로 최적화된 그래프의 테이블 정보로부터 새로운 온도를 스케일 피팅으로부터 농도를 구할 수 있게 된다. Figure 3.5.1에서는 6점 최적화 알고리즘을 이용하여 계산된 재구성 온도분포를, Figure 3.5.2는 농도분포의 결과를 보여준다. 저온부 오차의 범위는 -64.3K ~ 50.6K로 나타내었고, 최고온도인 중심부의 온도차이는 1K로 가장 근접한 결과를 보였으며, 반면에 경계부에서 -64K로 가장 큰 오차를 보였다. 고온부 오차범위는 -74.1K ~ 50.1K으로 나타났다. 저

온부의 농도의 차이는 $-0.013 \sim 0.024$ 범위였고, 고온부에서는 $-0.012 \sim 0.017$ 의 범위를 보였다.

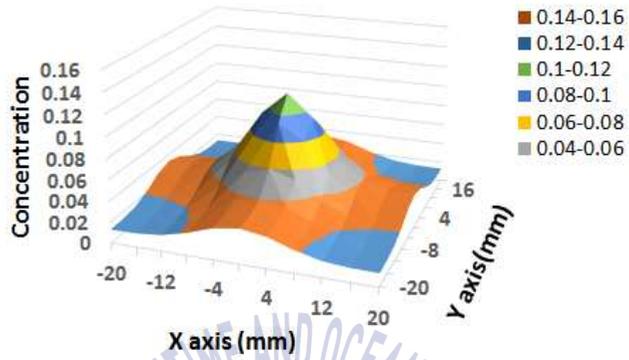


(a) 2D temperature distribution at low temperature

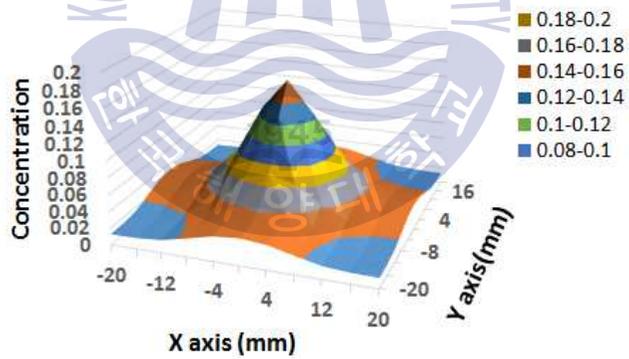


(a) 2D temperature distribution at high temperature

Figure 3.5.1 2D temperature distribution using 6peaks curve fitting



(a) 2D concentration distribution at low temperature



(a) 2D concentration distribution at high temperature

Figure 3.5.2 2D concentration distribution using 6peaks curve fitting

3.6 각 fitting법의 비교 평가

본 장에서는 가상의 온도장과 농도장을 이용하여 동일한 조건에서 각각의 Curve fitting algorithms를 적용하여 측정데이터를 재구성 해보았다. 본 절에서는 재구성 데이터를 비교분석하고 각각의 fitting법을 비교 평가한다.

Table 3.6.1과 3.6.2는 각각 저온부와 고온부의 온도오차와 농도오차를 정리한 것으로서 각각의 알고리즘의 오차범위를 쉽게 확인 할 수 있다. 우선 저온부에서는 상호상관 알고리즘의 온도오차범위가 가장 컸으며 6-peaks, 1P2R, 2P3R 순으로 오차가 줄어들었다. 고온부에서는 1P2R의 온도오차범위가 가장 컸으며 2P3R, 상호상관, 6-peaks 순으로 오차가 가장 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 농도장의 오차범위는 온도장과 마찬가지로 상호상관법의 농도오차범위가 가장 크고 다음으로 6-peaks이고 1R2P와 2P3R은 동일한 농도오차범위를 가졌다. 고온부에서는 6-peaks의 1P2R과 상호상관의 농도오차범위가 가장크고 다음으로 2P3R, 6peaks 순이었다.

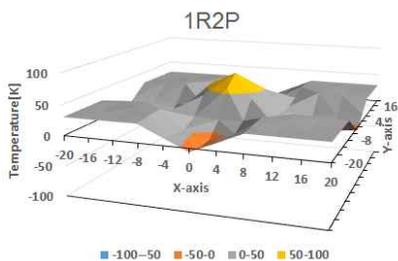
	Crue fitting Algorithms			
	1P2R	2P3R	Cross-correlation	6-peaks
Temperature	-9.8	-29.8	-83.0	-64.3
Error Range [K]	~76.7	~34.4	~55.0	~50.6
Concentration	0.013	0.012	-0.015	-0.013
Error Range	~0.051	~0.04	~0.036	~0.024

Table 3.6.1 Evaluation for each curve fitting at low temperature

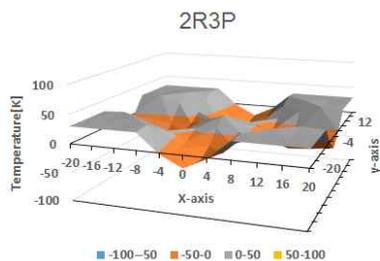
	Curve fitting Algorithms			
	1P2R	2P3R	Cross-correlation	6-peaks
Temperature	-54.8	-62.9	-99.0	-74.1
Error Range [K]	~226.4	~200.3	~94.8	~50.1
Concentration	0.016	0.02	-0.014	-0.012
Error Range	~0.07	~0.07	~0.04	~0.017

Table 3.6.2 Evaluation for each curve fitting at low temperature

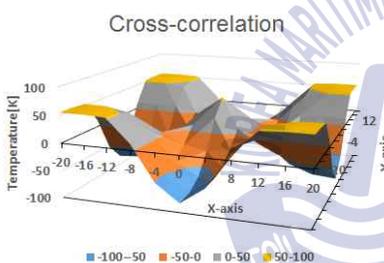
Figure 3.6.1과 3.6.2는 저온부와 고온부 영역의 온도 에러 분포를 나타내는 그림이다. 1P2R 적용 시 주변부의 온도에 대한 정확성은 상대적으로 높지만 중심부의 온도에 대한 신뢰성은 많이 떨어지는 편이다. 2R3P 적용 시 주변부의 온도의 정확성은 양호한편이며, 저온부의 중심부는 오차가 34.4K으로 매우 양호하였으나 고온부 측정시 200K가량 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다. 상호상관법 적용 시 저온부에서는 가장 큰 오차범위를 가졌지만 고온부로 가면서 1P2R, 2R3P보다 개선된 결과를 얻는 것을 확인 할 수 있었다. 마지막으로 6-peaks는 타 알고리즘과 비교하였을 때 저온부와 고온부에서 온도오차범위가 일정한 것을 확인 할 수 있었다. 특히나 저온부에서의 오차범위는 타 알고리즘보다 월등히 앞서나가는 것이 확인 되었다.



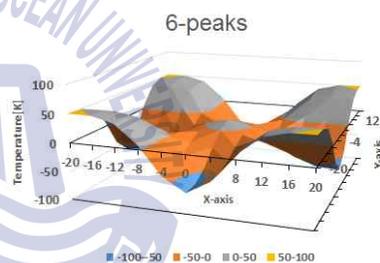
(a) using one-peak-two-ratio



(b) using two-peaks-three-ratios

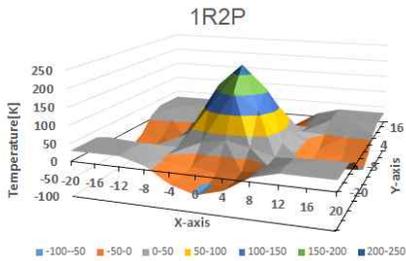


(c) using cross-correlation

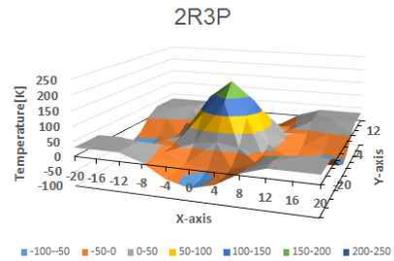


(d) using 6-peaks

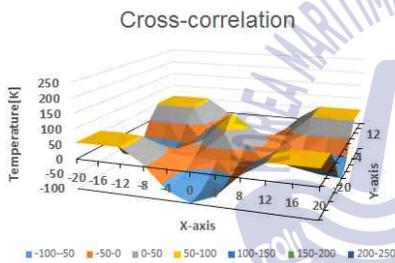
Figure 3.6.1 The temperature error distribution at low temperature



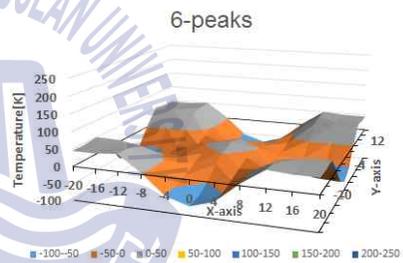
(a) using one-peak-two-ratio



(b) using two-peaks-three-ratios



(c) using cross-correlation



(d) using 6-peaks

Figure 3.6.2 The temperature error distribution at low temperature

제4장 결론 및 고찰

본 연구에서는 현재까지 개발된 흡수스펙트럼 재구성 알고리즘을 동일한 데이터를 이용하여 비교평가하였다. 배기가스 연소를 구현하기 위해 11 X 11 흡수선을 121개의 온도분포, 농도분포 Grid를 구성하였고, 이론적인 방법으로 가상흡수선데이터를 모델링 하였다. 이 가상 데이터를 기반으로 one-Ratio-two-Peaks curve fitting, two-Ratios-three-Peaks curve fitting, 상호상관법 기반 curve fitting, six-peaks curve fitting을 적용하였고 이를 비교평가 하였다. 저온부에서는 2R3P 적용시 가장 정확한 결과를 얻을 수 있었으며 고온부에서는 six-peaks 적용시 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 또한, 농도범위는 저온부에서 one-Ratio-two-Peaks와 two-Ratios-three-Peaks가 오차범위가 가장 적었으며 고온부에서는 six-peaks의 오차범위가 가장 적었다. 각각의 온도범위에 따라 최적의 알고리즘이 존재하나, 이들을 적절히 조합하여 가장 정확한 결과를 알아낼 수 있는 알고리즘이 필요하다고 판단된다.

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.

- [5] Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, Vol. 73, No. 3, pp. 410-419.(doi: 10.1016/j.saa.2008.09.004)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)

- [8] 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)
- [9] Eckbreth, A.C., *Laser diagnostics for combustion temperature and species*, Cambridge, Mass., ABACUS Press 1988.
- [10] 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.
- [11] 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.)

- [12] 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.
- [13] 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
- [14] Doo-Won Choi¹, Min-Gyu Jeon², Gyeong-Rae Cho², Takahiro Kamimoto¹, Yoshihiro Deguchi¹, and Deog-Hee Doh². (2016a) Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), Journal of Thermal Science Vol.25, No.1 84-89
- [15] DOOWON CHOI¹, KWANGNAM KIM², GYONGRAE CHO^{3†}, JOONHWAN SHIM¹, DONGHYUK KIM³, YOSHIHIRO DEGUCHI⁴, DEOGHEE DOH^{3†}.(2016b) 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

[16] DOOWON CHOI^{1,3}, GYONGRAE CHO^{2†}, JOONHWAN SHIM¹, YOSHIHIRO DEGUCHI³, DONGHYUK KIM², DEOGHEE DOH^{2†}. (2016c) “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

[17] DOOWON CHOI¹, GYONGRAE CHO^{1†}, YOSHIHIRO DEGUCHI², TAESIL BAEK³, DEOGHEE DOH. (2016d) 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

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

감사의 글

신설된 신재생에너지 지열사업 분야에 업무를 맡게 되었다. 전문지식 부족으로 난관에 처할 때 마다 학업에 대한 열망이 생겼다. 그리하여 관련 분야인 냉동공조공학과 석사과정에 입문하고 보니, 시간이 갈수록 스스로 부족한 점이 많다는 것을 깨닫게 되었다.

이제 학위과정을 마치고 보니, 입학이 엇그제처럼 느껴진다. 여전히 부족한 지식을 채우는 데에는 목마름을 느끼지만, 주위를 살펴본 다음 또 다른 도전의 기회를 엿보고자 한다.

이 논문을 완성할 수 있도록 시종일관으로 지도해 주신 도덕희 지도교수님께 무한한 감사를 드립니다.

심사과정에서 세심한 지도와 격려를 아끼지 않으셨던 최재혁교수님, 황광일교수님께도 감사를 드립니다.

학위를 이수하기 까지 많은 교수님들의 지도와 도움을 받았는데, 김의간 교수님, 윤상국 교수님, 조종래 교수님께도 감사를 드립니다.

자료 수집과 실험 및 토론과정에서 많은 환경적 도움을 주신 케이완상사와 연구실 선, 후배님께도 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 석사과정 기간에 도움이 필요할 때마다 늘 함께 해 준 임영규 친구와 말없이 이해와 응원을 해 준 사랑하는 나의 아내 김양희와 딸 송희에게도 감사의 말을 전합니다.

많은 분들의 도움으로 석사 학위를 받을 수 있게 된 점 다시 한번 감사를 드립니다.

함께해 주신 많은 분들에게 남은 여정동안 보람된 날들이 될 수 있도록 최선을 다 하고자 합니다.

귀한 만남을 허락하신 하나님께 이 모든 감사와 영광을 돌립니다!!

2017년 07월 홍창호