



## 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](#)

공학박사 학위논문

컴퓨터토모그래피 레이저흡수분광법 (CT-TDLAS) 기반  
온도장 및 농도장 측정의 성능개선 연구

Study on Performance Enhancements of Temperature and  
Concentration Fields Measurements based on CT-TDLAS



지도교수 심 준 환

2016년 8월

한국해양대학교 대학원

전자통신공학과

최 두 원

本 論文을 崔斗遠의 工學博士 學位論文으로 認准함.



|     |       |     |
|-----|-------|-----|
| 위원장 | 도 덕 희 | (인) |
| 위 원 | 심 준 환 | (인) |
| 위 원 | 박 동 국 | (인) |
| 위 원 | 김 응 수 | (인) |
| 위 원 | 조 경 래 | (인) |

2016년 6월 24일

한국해양대학교 대학원

## 목 차

|                       |    |
|-----------------------|----|
| List of Tables .....  | i  |
| List of Figures ..... | ii |
| Abstract .....        | v  |

### 제1장 서 론

|                      |   |
|----------------------|---|
| 1.1 연구 배경 .....      | 1 |
| 1.2 연구 목적 및 내용 ..... | 3 |

### 제2장 온도장 및 농도장 측정법의 이론적 배경

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 2.1 Beer-Lambert law .....       | 4  |
| 2.2 선 강도 .....                   | 8  |
| 2.3 선폭확장 함수 .....                | 10 |
| 2.3.1 도플러 선폭확장 .....             | 11 |
| 2.3.2 충돌에 의한 선폭확장 .....          | 14 |
| 2.3.3 Voigt 함수 .....             | 17 |
| 2.4 레이저 흡수분광법 .....              | 21 |
| 2.5 흡수데이터 신호처리와 흡수그래프 변환과정 ..... | 23 |
| 2.6 흡수선의 온도 의존성 .....            | 25 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 2.7 컴퓨터토모그래피 흡수분광학 ..... | 28 |
|--------------------------|----|

### 제3장 온도장 및 농도장 측정 개선법

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 3.1 ART, MART법 .....                | 31 |
| 3.2 초기 값 개선 .....                   | 33 |
| 3.3 실험적인 선폭 함수의 개선 .....            | 35 |
| 3.3.1 Flat plate burner 실험 장치 ..... | 35 |
| 3.3.2 온도 일관성 실험 .....               | 37 |
| 3.3.3 흡수 스펙트럼 분석 .....              | 37 |
| 3.3.4 선폭계수의 선정 .....                | 44 |

### 제4장 재구성 알고리즘 개발

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 4.1 세 파장 계수비교를 이용한 Fitting ..... | 48 |
| 4.1.1 가상의 2D 온도분포 만들기 .....      | 48 |
| 4.1.2 격자 구성과 레이저 빔 .....         | 52 |
| 4.1.3 가상데이터의 재구성 온도분포 결과 .....   | 54 |
| 4.1.4 분젠 타입 버너 실험 장치 .....       | 60 |
| 4.1.5 실험 결과 .....                | 62 |
| 4.1.6 실험데이터의 재구성 온도분포 결과 .....   | 66 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 4.2 Full-Profile 상호상관계산 알고리즘 ..... | 70  |
| 4.2.1 패턴매칭 방법 .....                | 70  |
| 4.2.2 가상의 2D 온도분포 만들기 .....        | 76  |
| 4.2.3 가상데이터의 재구성 온도분포 결과 .....     | 84  |
| 4.3 6점 최적화 알고리즘 .....              | 86  |
| 4.3.1 6점 최적화 알고리즘의 개념 .....        | 86  |
| 4.3.2 가상의 2D 온도분포 만들기 .....        | 90  |
| 4.3.3 가상데이터의 재구성 온도분포 결과 .....     | 93  |
| 4.3.4 엔진 실험 장치 .....               | 96  |
| 4.3.5 실험 결과 및 재구성 온도분포 결과 .....    | 99  |
| 제5장 요약 및 결론 .....                  | 105 |
| 참고문헌 .....                         | 107 |
| 감사의 글 .....                        | 115 |

## List of Tables

|                  |                                                                            |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Table 2.1</b> | Coefficients of the polynomial expression for the partition of $H_2O$ .... | 9  |
| <b>Table 4.1</b> | Information of parameters used for two Gaussian function ...               | 50 |
| <b>Table 4.2</b> | Information of parameters used for Gaussian function .....                 | 77 |
| <b>Table 4.3</b> | Information of spectrum lines of $H_2O$ at reference temperature ...       | 78 |
| <b>Table 4.4</b> | Information of 6 spectrum lines of $H_2O$ at reference temperature ...     | 88 |
| <b>Table 4.5</b> | Information of parameters used for Gaussian function .....                 | 90 |



## List of Figures

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 2.1 Schematic diagram of Beer Lambert law .....                                                     | 5  |
| Fig. 2.2 Boltzmann distribution at different temperature condition .....                                 | 8  |
| Fig. 2.3 FWHM of gaussian lineshape function .....                                                       | 13 |
| Fig. 2.4 Comparison of three line broadenings .....                                                      | 20 |
| Fig. 2.5 Energy transfer process and typical TDLAS system .....                                          | 22 |
| Fig. 2.6 Typical absorption signals .....                                                                | 23 |
| Fig. 2.7 Making absorption spectrum .....                                                                | 24 |
| Fig. 2.8 H <sub>2</sub> O absorption spectrum of variable temperature at 1388nm<br>~ 1388.6nm .....      | 26 |
| Fig. 2.9 Temperature dependence of three absorption lines .....                                          | 27 |
| Fig. 2.10 Temperature dependence of intensity ratio .....                                                | 27 |
| Fig. 2.11 Analysis grid and laser beam path .....                                                        | 29 |
| Fig. 2.12 CT analysis procedure .....                                                                    | 30 |
| Fig. 3.1 Estimate process of initial temperature .....                                                   | 34 |
| Fig. 3.2 Experimental equipment of the flat plate burner .....                                           | 36 |
| Fig. 3.3 Results of experimental repeatability using flat plat burner<br>at the varied temperature ..... | 40 |
| Fig. 3.4 Experiment absorption spectrum of H <sub>2</sub> O at 1338.0~1338.6nm .....                     | 43 |



|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 3.5 Curve fitting results of normalized absorption spectrums from calculation and experiment .....                              | 47 |
| Fig. 4.1 Phantoms for 2D temperature distribution .....                                                                              | 50 |
| Fig. 4.2 Analysis grids and 22 beam paths .....                                                                                      | 52 |
| Fig. 4.3 The average deviation of phantom and calculation temperature ....                                                           | 56 |
| Fig. 4.4 Reconstructed 2D temperature distribution calculated at one Gaussian function .....                                         | 57 |
| Fig. 4.5 Reconstructed 2D temperature distribution calculated at superimposed two Gaussian functions .....                           | 58 |
| Fig. 4.6 The schematic experimental setup with 10 beams .....                                                                        | 60 |
| Fig. 4.7 Absorption spectrums of H <sub>2</sub> O with 10 path lasers .....                                                          | 63 |
| Fig. 4.8 2D temperature distributions measured by thermocouple .....                                                                 | 64 |
| Fig. 4.9 Comparison of the average temperature deviation by using one ratio of two-peaks and two ratios of three-peaks methods ..... | 67 |
| Fig. 4.10 Results of reconstructed 2D temperature distribution .....                                                                 | 68 |
| Fig. 4.11 Calculation process of the template matching method .....                                                                  | 72 |
| Fig. 4.12 Configuration of pattern change .....                                                                                      | 73 |
| Fig. 4.13 Flow chart of pattern matching algorithm .....                                                                             | 74 |
| Fig. 4.14 Phantom for 2D temperature distribution .....                                                                              | 76 |
| Fig. 4.15 Phantom absorption graphs of horizontal lasers .....                                                                       | 80 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 4.16 Phantom absorption graphs of vertical lasers .....                                   | 82  |
| Fig. 4.17 Reconstructed temperature distribution .....                                         | 84  |
| Fig. 4.18 The selected 6-line profiles .....                                                   | 87  |
| Fig. 4.19 Flow chart of 6-line profiles algorithm .....                                        | 88  |
| Fig. 4.20 Phantoms distributions at low temperature region .....                               | 90  |
| Fig. 4.21 Phantoms distributions at high temperature region .....                              | 91  |
| Fig. 4.22 Reconstructed distributions at low temperature region .....                          | 93  |
| Fig. 4.23 Reconstructed distributions at high temperature region .....                         | 94  |
| Fig. 4.24 The outline of an experimental apparatus and measurement cell ....                   | 96  |
| Fig. 4.25 Picture of engine experiment system .....                                            | 97  |
| Fig. 4.26 Absorption graphs of H <sub>2</sub> O spectrum with 16 beams .....                   | 101 |
| Fig. 4.27 Temperature history measured by thermocouple at the center<br>( X=0mm, Y=0mm ) ..... | 102 |
| Fig. 4.28 Reconstructed results in engine exhausts .....                                       | 103 |

# Study on Performance Enhancements of Temperature and Concentration Fields Measurements based on CT-TDLAS

Choi Doo Won

Department of Electronics and Communication  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

CT (Computed Tomography) – TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) is a non-intrusive diagnostic technique that allows for spatially resolved measurements of temperature and species concentration combustion fields such as burners, engines, gas turbines and furnaces and so on. Also, temperature and concentration distribution on the cross-section of a combustion flame enable to analyze elaborately on the combustion phenomena. The main purpose of this work is to optimize a reconstruction of temperature and H<sub>2</sub>O number density distribution based on CT-TDLAS. In this study, the optimized MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) method was proposed for the data reconstruction of CT-TDLAS and the results were compared with ART (Algebraic Reconstruction Technique) method. Also, MLOS

(Multiple Line of Sight) method was suggested to decide optimal initial values for iterative calculation of CT-TDLAS. Finally three new signal fitting algorithms, Two-Ratios of Three-Wavelength Fitting algorithm, Full-Profile Cross-Correlation algorithm and 6-Line-Profiles Fitting algorithm, were proposed for reconstruction of temperature and concentration using TDLAS system and their reconstruction performances were quantitatively compared. Three types of algorithms were theoretically investigated by using virtual lasers and were demonstrated experimentally by utilizing the data obtained in a burner and an engine experiment in case of necessity. In conclusion, 6-Line-Profiles Fitting Algorithm was a very stable calculation and showed good agreement with the numerical and experimental data and Also, number density and temperature were possible to reconstruct simultaneously. it is expected that it enables to apply the real-time 2D temperature and species concentration measurement in various combustion fields.

**KEY WORDS:** Tunable diode laser absorption spectroscopy 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법; Computed Tomography 컴퓨터토모그래피; Exhaust gas 배기가스; Engine 엔진; Burner 버너.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

2008년 영국 가디언 (Guardian)지가 유엔의 미공개 문서를 근거로 보도한 내용에 따르면 해운업계로부터 배출되는 온실가스의 실제 규모는 이전의 발표보다 세 배 정도 많은 것으로 나타났다. 또한, 이 보고서에서 전 세계 상선의 연간 이산화탄소 배출량은 12억 2000만 톤으로 전 세계 주요 온실가스 배출량의 4.5%가 된다고 보고하고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 차이는 기존의 온실가스 농도 추정방법이 부정확함을 시사한다. 또한 선박이 자동차, 주택, 농업, 산업에 이어 단일분야에서는 가장 많은 온실가스를 배출하고 있는 상황이다. 이러한 배기가스 분출의 심각성을 인식하여 교토의정서의 공식효력이 발하면서, 2013년 1월 1일부터는 온실가스 감축량을 의무적으로 시행해야 하고, MARPOL (International Marine Pollution) 규정에 따라 SEEMP (Ship Energy Efficiency and Management Plan) 사항을 이행하는 선박만이 운항할 수 있도록 규제하고 있다. 이런 정황을 볼 때, 선박배출가스를 정밀히 측정할 수 있는 장치의 필요성과 시장의 요구가 증대되고 있는 상황임을 알 수 있다.

선박의 배기가스량을 정확히 측정하기 위해서는 배기가스 배출구의 전체 영역에 걸쳐 측정해야 신뢰도가 있는 측정이 된다. 전통적인 측정방식인 점방식 측정방법으로는 Lim et al이 고안한 SAW (Surface Acoustic Wave) 법이 있고, Fine et al이 고안한 반도체 (Semi-conductor) 법, Chen et al이

고안한 열전도 (Thermal conductivity) 법, Dossi et al에 의해 고안된 전기 화학 (Electrochemical) 법들이 있다<sup>[2]-[5]</sup>. 하지만, 이와 같은 점 측정 방식으로는 단면적이 넓은 선박과 같은 배기구의 가스 농도를 정밀하게 측정하는 것은 불가능하다.

최근 선박의 배기가스를 정밀하게 측정하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있는데 Yuki와 Murata는 배출구 내부의 연소를 실시간으로 통제하기 위하여 가스의 농도를 레이저분광법으로 측정하는 방식을 사용하였다<sup>[6]</sup>. 그 외에도 다양한 분야에서 CT와 레이저분광법을 이용한 연구가 계속해서 진행되고 있다. Deguchi et al 연구팀은 2차원 온도장 및 농도장을 동시 측정할 수 있는 새로운 CT-TDLAS (Computed Tomography-Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 기법을 개발하였다<sup>[7]</sup>. 이러한 측정 방식은 배기가스 농도를 정밀하게 측정할 수 있는 대안책이 될 수가 있다. 하지만, CT-TDLAS로 측정된 데이터를 농도로 재구성하는 방법의 성능 향상을 위해서는 ART (Algebraic Reconstruction Technique)법과 심플렉스 (Simplex algorithm)법은 개선될 필요가 있다<sup>[8],[9]</sup>. 또한 전통적인 신호 커브피팅 (Signal curve fitting)법은 레이저 빔으로부터 얻은 흡수신호 값의 최대값들의 비를 이용한다. 이 방법의 단점은 노이즈 (Noise)가 포함된 측정신호로부터 정확한 최대값을 찾기가 어려우며, 최대값의 흡수파장만을 커브피팅의 정보로 이용하기 때문에 다른 파장들의 흡수영역은 고려하지 않게 되므로 정확한 농도 값을 산출할 수가 없다.

그러므로 본 연구에서는 이를 해결하기 위한 방안으로 새로운 방법의 커브피팅 알고리즘과 최적화된 재구성 온도와 농도 산정법을 제시한다.

## 1.2 연구 목적 및 내용

온도를 측정하기 위한 도구로 일반적으로 서모커플 (Thermocouple)이 가장 많이 이용되고 있다. 서모커플은 점 측정 방식이기 때문에 넓은 면적의 영역을 실시간으로 측정하기에는 많은 제약이 따른다. 이에 반해, TDLAS 방식은 비접촉 측정이 가능하며, kHz 단위의 빠른 응답성을 보이기 때문에 정확한 실시간 측정이 요구되는 시스템에 적합하다. CT 해석기법을 접목한 CT-TDLAS 기술을 활용하면 연소장의 온도와 농도를 다차원분석이 가능하게 된다. 배기가스 분석에 활용 시에 다양한 연소시스템의 성능향상을 도모할 수 있으며, 각종 유해물질의 모니터링에도 활용될 수가 있다.

본 연구에서는 CT-TDLAS 시스템을 구축하여 1388nm 영역의  $H_2O$  흡수 스펙트럼 분석을 통한 2차원 온도장 및 농도장을 정밀하게 측정하기 위한 시스템을 소개하였다. 첫 번째로, CT-TDLAS에서 재구성된 온도 및 농도 계산 방식으로 최적화된 MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)법을 제안하였다. 두 번째로, 신호 커브피팅 방법으로 세 파장 계수비교를 이용한 Fitting 알고리즘과 Full-Profile 상호상관계산 알고리즘과 6점 최적화 알고리즘의 3가지 신호 커브피팅법을 제시하였다. 새로운 알고리즘의 성능평가를 위하여 가상데이터를 통한 이론적 검증과 버너 (Burner)와 엔진 (Engine) 배기가스의 레이저 측정을 이용한 실험적 검증을 실시하였다. 이를 통해, 실시간으로 2차원 온도와 농도의 계측이 가능한 최적화된 CT-TDLAS 시스템을 개발하고자 한다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 Beer-Lambert law

흡수 분광학의 원리는 Beer-Lambert의 법칙으로 식 (2.1) ~ (2.3)과 같이 나타낼 수 있다. 빛이 흡수 매체를 통과할 때 흡수, 투과된 빛의 세기는 단위 부피 안의 기체의 입자수인 농도와 관련이 있으며, 흡수량 ( $A_\lambda$ )은 레이저 초기신호 ( $I_\lambda$ )와 투과된 신호 ( $I_{\lambda 0}$ )의 강도비로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_\lambda}{I_{\lambda 0}} = \exp\{-A_\lambda\} \quad (2.1)$$

$$= \exp\left\{-\sum_i n_i L \alpha_\lambda\right\} \quad (2.2)$$

$$= \exp\left\{-\sum_i \left(n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{Vi,j}\right)\right\} \quad (2.3)$$

여기서, 아래첨자  $i$ ,  $j$ ,  $\lambda$ 는 각각 기체의 종, 레이저 번호, 파장을 나타내고,  $\alpha_\lambda$ 는 흡수계수 (Absorption coefficient)이며,  $S_{i,j}(T)$ 는 온도함수인 선 강도,  $G_{Vi,j}$ 는 선폭함수이다.  $n_i$ 는  $i$ 종 기체의 개수밀도 (Number density),  $L$ 은 흡수길이이며, Fig. 2.1에서 Beer-Lambert의 원리를 다이어



그림으로 나타내고 있다.

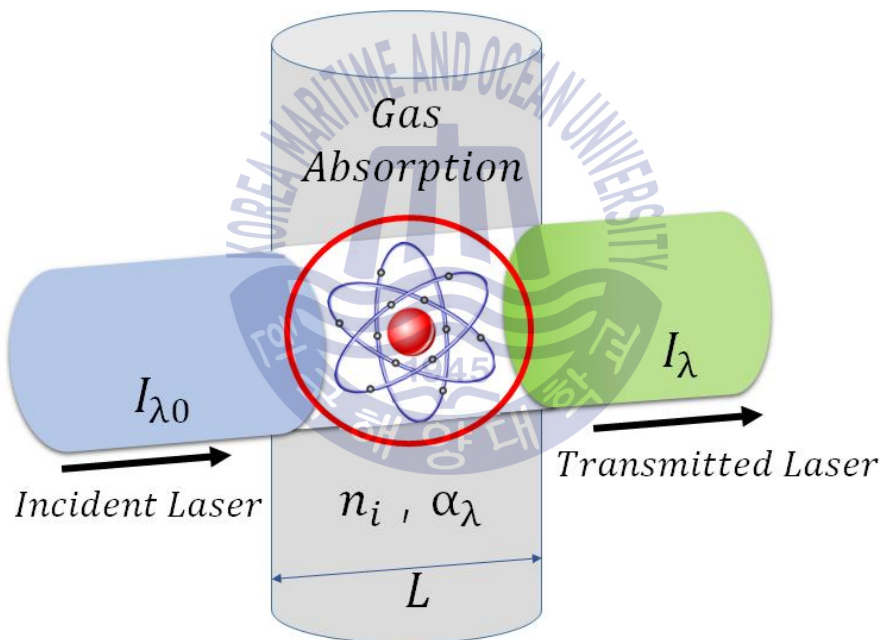


Fig. 2.1 Schematic diagram of Beer-Lambert law

## 2.2 선 강도 (Line-strength)

선 강도의 단위는 압력에 따른  $S[cm^{-2}atm^{-1}]$ 와 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge MA, USA에서 제공하는 각 분자의 파장에 대한 HITRAN (High Resolution Transmission)에 의해 산출되는 개수 밀도 단위인  $S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}]$ 로 나타낸다.

$$S[cm^{-2}atm^{-1}] = \frac{S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}] \times n[mol/cc]}{P[atm]} \quad (2.4)$$

식 (2.4)에서  $n$ 은 개수밀도  $[mol/cc]$ ,  $P$ 는 압력  $[atm]$ 이다. 여기에 이상기체 상태방정식을 적용하고, 압력의 단위를  $[dynes/cm^2]$ 에서  $[atm]$ 으로 변경하면 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $k$ 는 볼츠만 상수 (Boltzmann constant),  $T[K]$ 는 대상가스의 온도이다. 식 (2.5)에서 볼츠만 상수 값을 대입하여 정리하면 식 (2.6)과 같이 간소화시킬 수 있다.

$$S = \frac{S^* \times (7.339 \times 10^{21})}{T} [cm^{-2} atm^{-1}] \quad (2.6)$$

기준온도 (Reference temperature: 296K)에서 식 (2.6)은 식 (2.7)로 나타낼 수 있다.

$$S = S^* \times (2.479 \times 10^{19}) [cm^{-2} atm^{-1}] \quad (2.7)$$

선 강도는 분자가 빛 에너지를 흡수한 상태에서 분자의 볼츠만 분포 (Boltzmann distribution)에 따른다. Fig. 2.2를 보면 분자의 회전양자수는 저온과 고온에서 확연하게 차이가 나며, 분자의 에너지 상태는 분자의 수축, 몰 농도와 관계한다. 이를 통해 선 강도는 온도에 따라 변화하는 온도의 함수임을 알 수 있다.

온도  $T$ 에서의 특정 천이영역  $i$ 에 대한 선 강도  $S_i(T_0)$ 는 분자의 기준 온도에서의 선 강도( $S_i$ )를 나타내며, 다양한 온도에서의 선 강도를 구하는 관계식은 다음의 식 (2.8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$S_i(T) \approx S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp \left[ -\frac{hcE''}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times \left[ 1 - \exp \left( \frac{-hcv_{0,i}}{kT} \right) \right] \left[ 1 - \exp \left( \frac{-hcv_{0,i}}{kT_0} \right) \right]^{-1} \quad (2.8)$$

여기서,  $h$ 는 플랑크 상수 (Planck' s Constant,  $6.6256 \cdot 10^{-27}[\text{erg} \cdot \text{s}]$ ),  $k$ 는 볼츠만 상수 ( $1.38062 \cdot 10^{-16}[\text{erg}/\text{K}]$ ),  $c$ 는 빛의 속도 (Light speed,  $3.0 \cdot 10^{10}[\text{cm}/\text{s}]$ ),  $v_0[\text{cm}^{-1}]$ 는 파수 (Wavenumber),  $E''[\text{cm}^{-1}]$ 는 저준위 에너지 (Lower-state energy)를 나타낸다.  $Q(T)$ 는 분배함수 (Partition function)이며, 분자의 에너지상태량에 관계하는 온도의 함수로써, 식 (2.9)와 같이 3차식의 함수로 나타낼 수 있다.

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

온도 구간별로 사용된 계수의 값은 Table 2.1에서 확인할 수 있으며 구간별로 사용된 계수  $a, b, c, d$ 의 값은 다음 논문을 참조한다<sup>[10]</sup>.

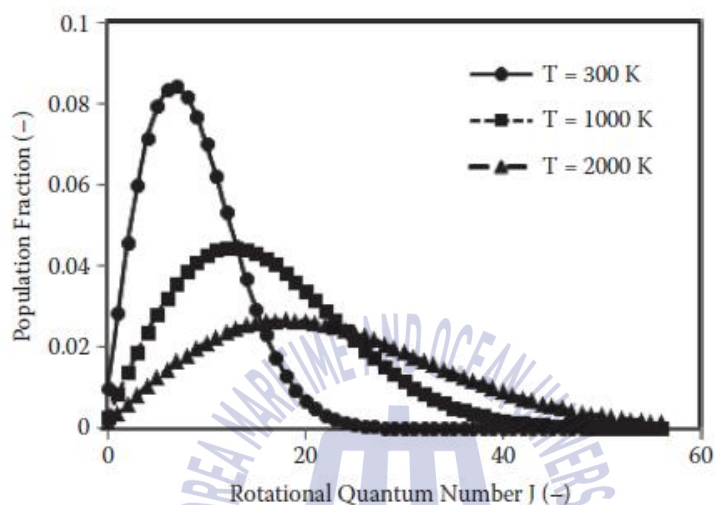


Fig. 2.2 Boltzmann distribution at different temperature condition<sup>[9]</sup>

Table 2.1 Coefficients of the polynomial expression for the partition of  $\text{H}_2\text{O}$ <sup>[10]</sup>

| Coefficients | $70 < T < 500\text{K}$    | $500 < T < 1500\text{K}$ | $1500 < T < 3005\text{K}$ |
|--------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| a            | $-0.44405 \times 10^1$    | $-0.94327 \times 10^2$   | $-0.11727 \times 10^4$    |
| b            | $0.27678 \times 10^0$     | $0.81903 \times 10^0$    | $0.29261 \times 10^1$     |
| c            | $0.12536 \times 10^{-2}$  | $0.74005 \times 10^{-4}$ | $-0.13299 \times 10^{-2}$ |
| d            | $-0.48938 \times 10^{-6}$ | $0.42437 \times 10^{-6}$ | $0.74356 \times 10^{-6}$  |

## 2.3 선폭확장 함수 (Broadening function)

선폭확장은 크게 모든 분자들에 균일한 선폭확장 (Homogeneous broadening)과 다수의 분자 그룹에 불균일한 선폭확장 (Inhomogeneous broadening)으로 분류된다. 또한 전이된 경우는 복합적 선형함수 (Multiple lineshape function)로 전환될 수 있다.

Heisenberg의 불확정성 원리에 의하면 원자나 분자 기체의 에너지 상태는 정확히 단정 짓기가 어려우므로 일정한 범위의 형태를 갖는다. 즉 에너지 준위가 복사전이로 인해 빛이 흡수되거나 방출되는 빛의 파장에도 범위가 존재하는데, 이를 자연적 확장 (Natural broadening)이라고 한다. 하지만 이는 다른 선폭확장에 비하여 극히 영향이 적으므로 무시될 수가 있다. 이에 대해서는 추후 자세히 설명하도록 한다.

레이저 빔의 통과 시에도 마찬가지로 가스 분자의 흡수에 의해 선폭확장이 발생된다. 선형함수의 선폭확장은 온도와 압력의 영향을 받음으로 가스의 농도 계측에 오차가 발생될 수 있다. 그러므로 정확한 농도 계측을 위해서는 선형함수의 선폭확장 해석이 중요하다. 선형함수식은 분광학적 흡수 계수에 대한 상대적인 변화를 반영하는 것으로써, 주파수에 대한 선형함수의 적분된 값을 1로 표준화시키면 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

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

### 2.3.1 도플러 선폭확장 (Doppler broadening)

도플러 선폭확장은 불균일한 선폭확장의 구조로부터 나타내어진다. 기체 분자의 스펙트럼에서 분자가 전자기파의 진행 방향과 가스 분자 그룹에 따라 다양한 속도분포를 가지기 때문에 도플러 효과에 의하여 흡수선이 일정하게 퍼지는 현상을 갖게 된다. 이는 고온의 가스일수록 열적 도플러 확장 (Thermal doppler broadening)은 더욱 크게 나타난다. 즉, 분자의 열 운동 (Thermal motion)에 의해 발생하는 분자 속도에 따른 도플러 선형함수 (Doppler lineshape function)는 Fig. 2.3과 같이 전형적인 가우시안 (Gaussian) 분포의 선형함수 그래프로 나타낸다.

도플러 선폭 (Doppler width)은 흡수선의 중심 진동수와 온도의 함수이며, 단파장 영역에서 흡수선의 진동수가 높게 나타날수록, 온도가 높을수록 커진다. 이는 식 (2.11)과 같이 나타나며, 선형함수의 선폭 FWHM (Full Width at Half Maximum)으로 나타내어진다.

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

또한, 도플러 반폭 (Doppler half-width)의 값은 식 (2.12)로부터 계산할 수 있다.

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

여기서,  $\Delta V_D$ 는 도플러 반폭,  $V_0[cm^{-1}]$ 는 중심 주파수 (Center frequency)이며,  $T[K]$ 는 온도,  $M$ 은 흡수하는 가스 분자의 분자량 (Molecular weight)을 나타낸다.





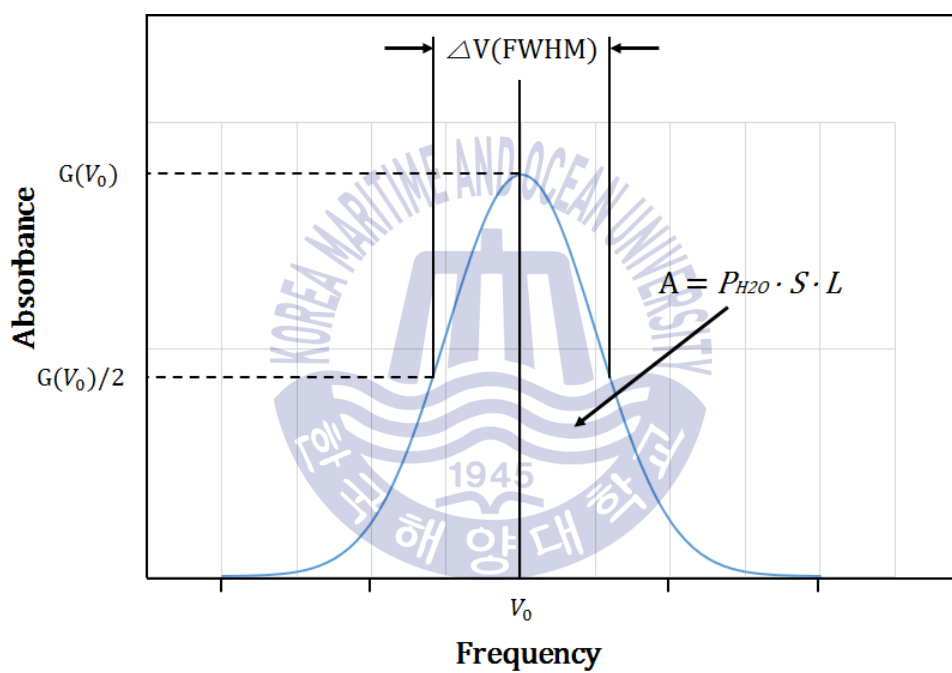


Fig. 2.3 FWHM of Gaussian lineshape function.

### 2.3.2 충돌에 의한 선폭확장 (Collisional broadening)

가스 분자들로 인해 발생하는 흡수신호는 지속적인 가스의 공급이 이루어지지 않을 경우 시간이 지남에 따라 흡수되는 양이 줄어들게 되고 선폭은 증가하게 된다. 이를 자연적인 흡수 수명에 따른 선폭확장이라 한다. 이와 함께 분자들의 운동에 의해 발생하는 즉, 분자 상호간의 충돌에 의한 선폭확장 또한 균일한 선폭확장과 선폭의 증가를 보인다. 이러한 선폭의 변화는 Lorentzian 선형함수로서 표현되어지며, 앞서 설명된 Heisenberg 불확정성 이론에 의해 설명 가능하다.

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

전자의 에너지가 낮은 상태가 아닌, 즉 흥분된 상태에서는 제한된 시간으로 인해 광자 (Photon) 에너지를 정확하게 나타낼 수 없다. 그러나 흡수 천이 (Absorption transition)의 에너지 상태가 자연적인 수명에 의해서 감소된다면, 자연적 확장으로서 선폭의 변화를 예측할 수가 있다. 자연적 확장은 Lorentzian 선형함수로서 식 (2.14)와 같이 나타낸다.

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

여기서,  $\Delta V_n[cm^{-1}]$ 은 자연적 선폭이며,  $V_0[cm^{-1}]$ 는 중심 주파수를 나타낸다. 이러한 자연적 선폭 확장은 대부분의 경우 비교적 긴 에너지 준위의 수명으로 인해 무시 할 수가 있다.

충돌에 의한 선폭 확장은 균일한 선폭 메커니즘이다. 이는 분자들 간의 상호 충돌에 의해 발생되며, 회전 및 진동에너지 준위의 변위를 일으킨다. 이는 이원자 분자에서 주로 발생되며 충돌의 존속 시간에 대한 선폭의 변화는 무시될 수가 있다. 이러한 선형함수는 식 (2.15)와 같이 Lorentzian profile에 의해 나타낼 수 있다.

$$G_C(V) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta V_C}{2}}{(V - V_0)^2 + \left(\frac{\Delta V_C}{2}\right)^2} \quad (2.15)$$

여기서,  $\Delta V_c[cm^{-1}]$ 는 Collisional 선폭을 나타낸다.

분자들 간의 상호충돌이 서로 다른 두 종류 이상의 가스들 사이에서 발생하였을 경우, “Process foreign gas broadening” 이라 하고, 동일 가스 분자들 간의 충돌의 경우, “Self-broadening” 이라고 한다. 다양한 가스로 구성된 환경에서 충돌 반폭 (Collision half-width)은 식 (2.16)과 같이 나타낸다.

$$\Delta V_c = P \sum_j (X_j 2\gamma_j) \quad (2.16)$$

여기서,  $X_j$ 는  $j$ 종 가스의 몰 분율 (Mole fraction)을 나타내며,  $\gamma_j [cm^{-1}atm^{-1}]$ 는 충돌 선폭 확장 계수 (Collisional broadening coefficient)이다. 이는 실험적으로 보다 정확히 결정되어지며, 온도함수로 나타내면 식 (2.17)과 같이 표현된다.

$$\gamma_j(T) = \gamma_j(T_0) \left( \frac{T_0}{T} \right)^{n_j} \quad (2.17)$$

여기서,  $T_0$ 는 기준 온도이며,  $n_j$ 는 온도 의존 계수 (Coefficient of temperature dependence)이다. 중심주파수에서의 Lorentzian 선형함수는 식 (2.18)과 같다.

$$G_C(V_0) = \frac{2}{\pi \Delta V_C} \quad (2.18)$$

### 2.3.3 Voigt 함수

도플러 선폭 확장은 주로 낮은 압력 하에서 큰 영향을 주며, 분자 충돌에 의한 선폭 확장은 높은 압력 하에서 주로 발생하게 된다. 그러나 일반적으로 분자들의 흡수에 의해 일어나는 흡수신호의 선폭 확장 현상은 자연 선폭 확장, 분자 충돌에 의한 선폭 확장, 그리고 도플러 선폭 확장의 세 가지 선폭 확장이 복합적으로 발생하게 된다. 그러므로 이러한 세 가지 선폭 확장을 절충한 선형함수 모델이 필요하게 된다. Gaussian 선형함수와 Collisional 선형함수를 절충한 선형함수 모델을 Voigt profile이라 하며, 선폭 확장이 독립적인 메커니즘이라면, Voigt profile은 다음과 같이 나타내어진다.

$$G_V(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_D(u) G_C(V-u) du \quad (2.19)$$

중심 주파수  $\nu_0$ 에서의 관계식은 식 (2.20)과 같다.

$$G_V(V) = G_D(V_0) \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-y^2) dy}{a^2 + (x-y)^2} = G_D(V_0) V(a, x) \quad (2.20)$$

$V(a, x)$ 는 Voigt profile을 나타내고, 변수  $a$ 는 도플러 선폭 확장과 충돌에 의한 선폭 확장의 상대적 영향성을 나타내며, 충돌에 의한 선폭 확장의 효과가 증가한다면 변수  $a$ 도 역시 증가하게 될 것이다.

$$a = \frac{\sqrt{\ln 2} \Delta V_C}{\Delta V_D} \quad (2.21)$$

변수  $x$ 는 흡수선의 중심으로부터의 무차원수의 거리이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \frac{2\sqrt{\ln 2} (V - V_0)}{\Delta V_D} \quad (2.22)$$

그리고 적분 변수  $y$ 는 식 (2.23)으로 나타낸다.

$$y = \frac{2u\sqrt{\ln 2}}{\Delta V_D} \quad (2.23)$$

Voigt 선형함수의 선포는 Whiting방법을 이용하여 다음의 식 (2.24)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$\Delta V_V = \frac{\Delta V_C}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta V_C^2}{4} + \Delta V_D^2\right)} \quad (2.24)$$

Voigt 선형함수의 최고 높이 (Peak height)는 중심주파수에서 찾을 수 있

으며, 그 관계식은 식 (2.25) ~ (2.27)과 같다.

$$G_V(V_0) = \left[ \left( \frac{\beta}{V_{ED} \sqrt{\pi}} \right) + \left( \frac{1-\beta}{\pi \cdot \Delta V_C} \right) \right] \quad (2.25)$$

$$\beta = \left( \frac{V_{ED}}{(\Delta V_C + V_{ED})} \right) \quad (2.26)$$

$$V_{ED} = \frac{\Delta V_D}{\sqrt{\ln 2}} \quad (2.27)$$

$\Delta V_D$  와  $\Delta V_C$  는 각각 Gaussian과 Lorentzian함수의 HWHM (Half-Width at Half Maximum)선폭이다. 본 연구에서는 온도와 압력에 의한 확장을 모두 고려한 Voigt 선형함수를 이용한다.

**Fig. 2.4**는 세 가지의 선폭확장의 모델들을 비교한 그래프이다. Voigt 선폭확장은 도플러 선폭확장과 압력에 의한 선폭확장의 혼합형임을 알 수 있다. Voigt 함수는 분광학에서 스펙트럼의 흡수량의 이론적인 정량 분석을 위해 사용되고 있으나, 실제 계측 시스템에서 Voigt 함수를 사용하기 위해서는 변수 값들이 수정되어야 한다. 또한, 실제 시스템에 적용하기 위하여 Voigt 함수와 함께 이론적으로 구한 흡수 스펙트럼 그래프를 실험에 의한 흡수스펙트럼 그래프와의 커브피팅을 통해 수정된 Voigt profile을 만들 필요가 있다. 이에 대해서는 본 논문의 3장에서 상세히 다룬다.

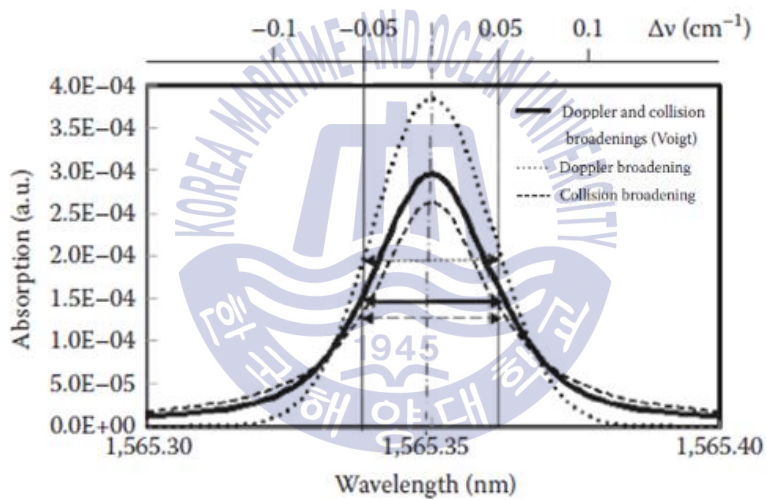


Fig. 2.4 Comparison of three line broadenings<sup>[9]</sup>



## 2.4 레이저 흡수분광법 (Diode Laser Absorption Spectroscopy)

Fig. 2.5 (a)는 기체 분자의 에너지 변환과정의 원리를 보여주고 있다. 전자가 레이저 빛에 의해 에너지를 흡수하게 되면, 전자는 바닥상태 (Lower state)에서 여기상태 (Upper state)로 천이된다. 즉, 기체분자의 에너지 흡수는 전자의 에너지 준위 (Energy level)의 변화를 일으키게 된다. 광자가 갖는 에너지는 다음의 플랑크 식 (Planck's equation)으로 계산할 수가 있다.

$$\Delta E = h\nu \quad (2.28)$$

여기서,  $\Delta E$ 는 에너지 준위차,  $h$ 는 플랑크 상수 (Planck's constant),  $\nu$  [cycles/s]는 진동수를 나타낸다. 식 (2.28)로부터 광자가 갖는 에너지와 진동수의 비가 플랑크 상수임을 알 수 있다.

Fig. 2.5 (b)는 전형적인 TDLAS 시스템의 장치구성도를 보여준다. TDLAS시스템은 LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)와 CARS (Coherent Anti-Stokes Raman spectroscopy)와 TOFMS (Time-of-Flight Mass Spectrometry)와 같은 레이저 진단 (Laser diagnostics) 장치에 비해 간단하게 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다. 또한 ppm에서 ppb 단위의 고감도이며, kHz 단위의 빠른 응답성을 보이며, 비접촉식의 가스농도 측정이 가능하다. 이러한 TDLAS의 빠른 응답성은  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $NO$  등의 가스들의 실시간 모니터링으로 응용이 가능하다.

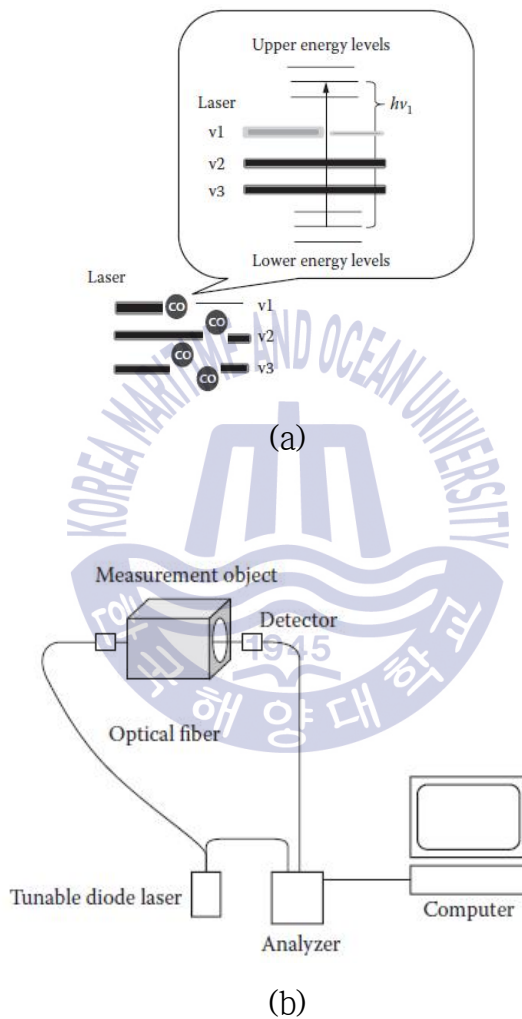


Fig. 2.5 Energy transfer process and typical TDLAS system<sup>[9]</sup>

## 2.5 흡수데이터 신호처리와 흡수그래프 변환과정

Fig. 2.6에서는 TDLAS 시스템에서 초기신호 (Reference)와 출력신호 (Signal)의 형태를 보여주고 있다. 레이저신호가 측정영역에서 기체에 의해 흡수가 일어나면, 흡수가 일어나는 주파수 영역 대에서는 신호 값의 voltage가 줄어든 것을 알 수 있다. 또한, 레이저 신호는 빔 스티어링 (Beam steering)에 의한 영향으로 노이즈가 생기는데 이러한 노이즈 신호 값을 보상하기 위해 Polynomial noise reduction technique<sup>[12]</sup>을 이용하여 흡수신호 값을 보정하였다.

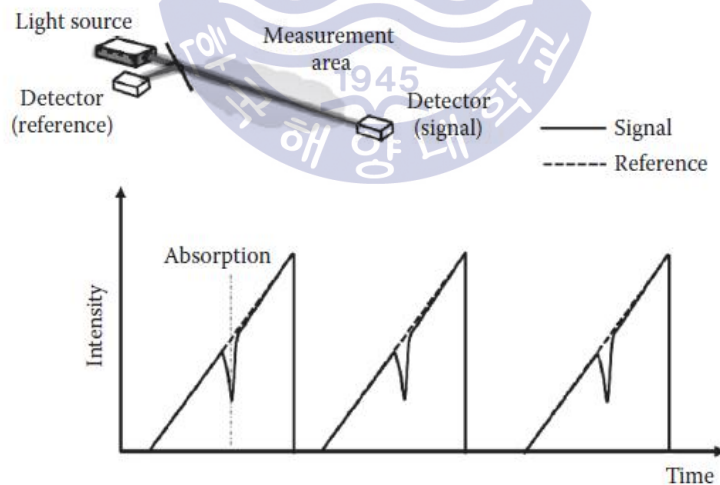


Fig. 2.6 Typical absorption signals<sup>[9]</sup>

Fig. 2.7은 본 연구에서 사용된 실제 흡수신호 값에 Polynomial noise reduction technique<sup>[12]</sup>을 적용하여 해석된 흡수스펙트럼 그래프를 보여주고 있다. 전기적 신호와 바이어스 등의 노이즈를 제거하기 위하여 500주의 신호 데이터들의 평균값을 구한 후 증폭시켰으며, 최종적으로 초기 신호와 출력신호의 차를 구하여 최종적인 흡수스펙트럼 그래프를 만들었다.

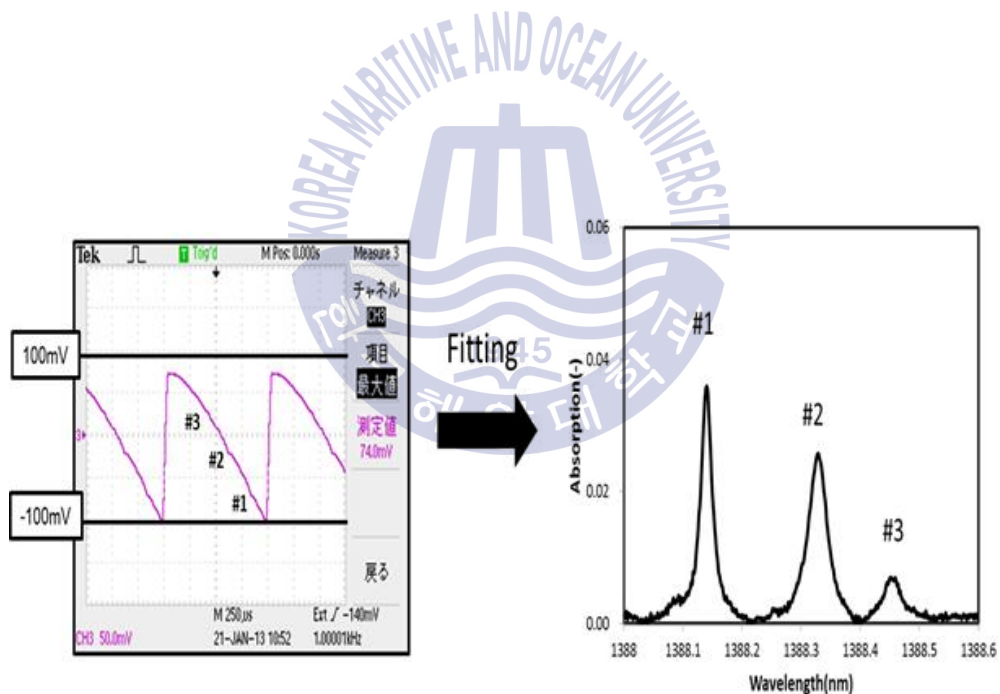


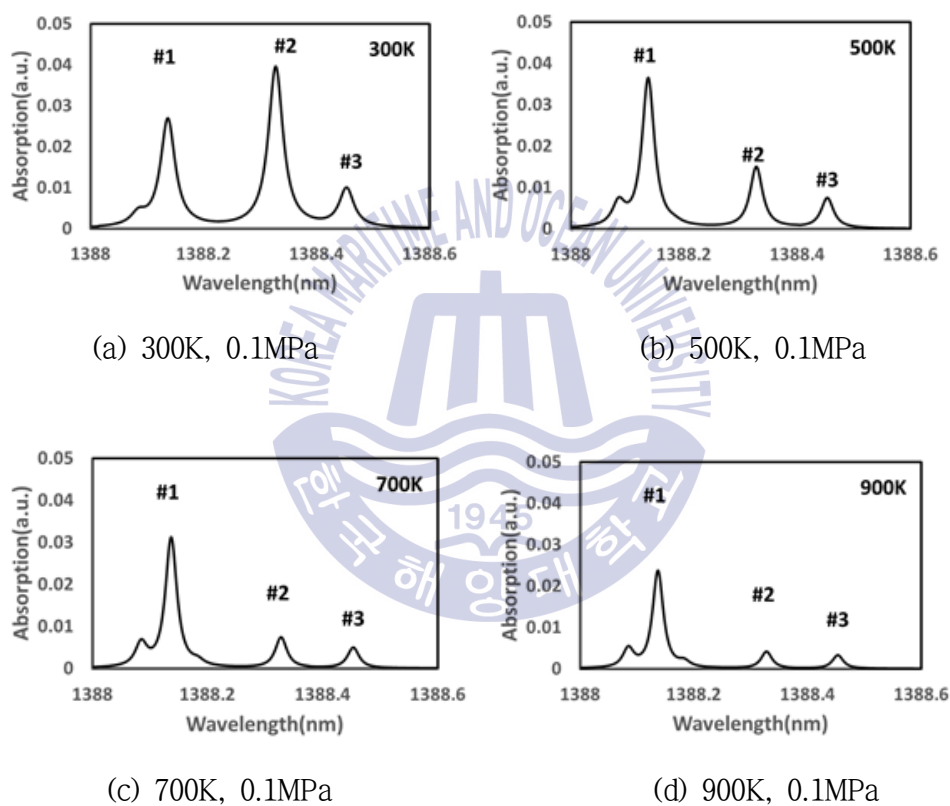
Fig. 2.7 Making absorption spectrum

## 2.6 흡수선의 온도 의존성

선 강도는 식 (2.8)로부터 온도에 따라 변화하는 함수임을 알 수 있었다. 본 연구에서는 HITRAN2008 database<sup>[13]</sup>를 이용하여 1388.0nm ~ 1388.6nm 영역대의 H<sub>2</sub>O 흡수 스펙트럼을 300K ~ 1500K 온도 범위에서 이론적으로 계산하였다. Fig. 2.8 (a) ~ (d)는 300K, 500K, 700K, 900K에서의 계산된 H<sub>2</sub>O 흡수스펙트럼 그래프이다. 온도변화에 따라 파장별로 흡수 값이 변하고 있음을 알 수 있으며, 피크 점에서 대표파장의 값이 존재함을 알 수 있다. 본 연구에서의 대표파장은 1388.135nm, 1388.326nm, 1388.454nm이며 구분을 용이하게 하기 위하여 각각 #1, #2, #3로 표현한다.

Fig. 2.9는 300K ~ 1500K 온도 범위에서 대표파장 #1, #2, #3의 흡수강도 값이 온도에 따라 변화하는 온도의존성 그래프를 보여주고 있다. #1, #2 는 #3에 비해 온도의존성이 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 2.10은 각 온도별로 #1/#2, #1/#3의 비를 나타낸 그래프이다. 이는 흡수 스펙트럼의 최대값의 비를 이용한 온도 산정에 이용할 수 있는 기초 데이터로 사용되며, 이 데이터는 본 연구의 세 파장 계수비교를 이용한 Fitting 알고리즘에 포함되어진다.



**Fig. 2.8** H<sub>2</sub>O absorption spectrum of variable temperature at 1388nm~1388.6nm

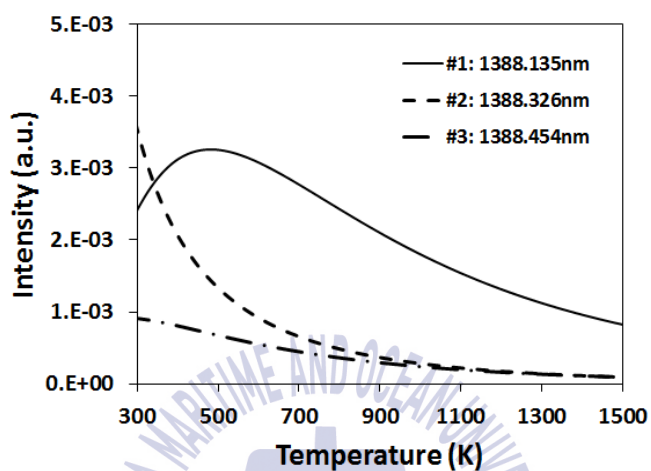


Fig. 2.9 Temperature dependence of three absorption lines

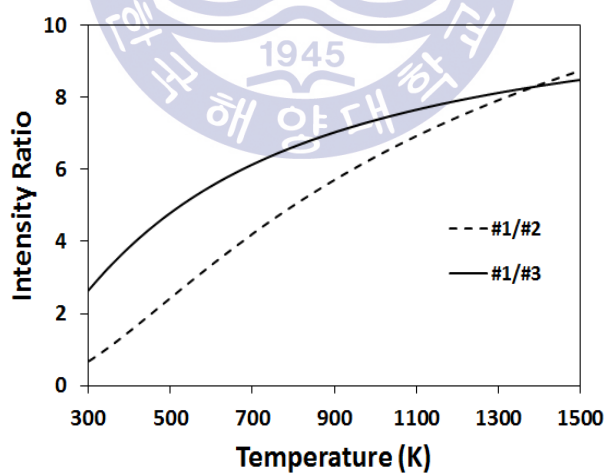


Fig. 2.10 Temperature dependence of intensity ratio

## 2.7 컴퓨터토폴로그래피 흡수분광학 (CT-TDLAS)

의학계에서 컴퓨터 단층촬영 기술로 불리고 있는 CT (Computerized Tomography)법과 분광학의 TDLAS 기술의 결합은 2차원 온도장과 농도장의 재구성 해석을 가능하게 한다. 특히, 컴퓨터 단층촬영법에서 ART, MART, SART, FBP법과 같은 다양한 반복 계산 알고리즘의 개발로 인하여 빠른 계산 속도와 시뮬레이션의 성능이 향상되고 있으며, 이러한 반복 계산법은 CT-TDLAS에서 온도와 농도의 최적화 격자 해석에 활용되고 있다. Fig 2.11은 본 연구에서 구성된 격자와 레이저 빔들을 2차원으로 배열시킨 개략도를 나타낸다. 2차원 배열의 레이저 빔은 가스의 단면 전체 (흡수매체)를 향하여 배치되는데, 이 배열들의 교차점이 해석단위 셀 (Cell)이 된다. 본 논문에서 사용된 온도 및 가스 농도장 (수 밀도를 나타냄)은 가로와 세로  $11 \times 11$  (121 cell) 형태의 정사각형 mesh로 구성되어 있으며, 셀의 단위길이  $L$ 은 4mm이다. 셀 영역을 지나가는 레이저 path의 흡수량은 다음의 식으로부터 구하였다.

$$A_{\lambda,j} = \sum_i^I n_i L_{i,j} \alpha_{\lambda,i} \quad (2.29)$$

여기서, 아래첨자  $i$ 는 셀 번호를 나타내고,  $j$ 는 레이저 path,  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다. 즉,  $A_{\lambda,j}$ 는  $j$  path 레이저와 파장  $\lambda$ 에서의 흡수량을 나타내고,  $j$  레이저가 지나가는 모든 셀들의 흡수량의 합을 말한다. 이 흡수량



값은 각각의 셀의 온도와 농도 값에 의존하게 되고, 교차하는 레이저 빔들의 흡수량 정보를 이용하여 새로운 온도와 농도 값은 재구성 계산되어 결정되게 된다.

Fig 2.12는 Simplex법을 사용한 CT 계산의 흐름도이다. 이 방법은 정확한 초기 값의 선정이 중요하며, 최소오차가 될 때까지 반복계산을 통하여 온도와 농도를 찾는 방법이다. 오차는 MSE (Mean Squared Errors)로 계산되며, 측정흡수량과 계산흡수량의 차이로 나타낸다.

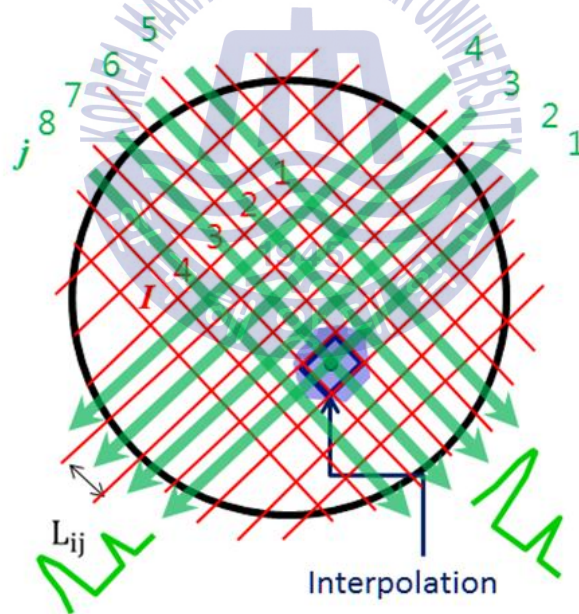


Fig. 2.11 Analysis grid and laser beam path

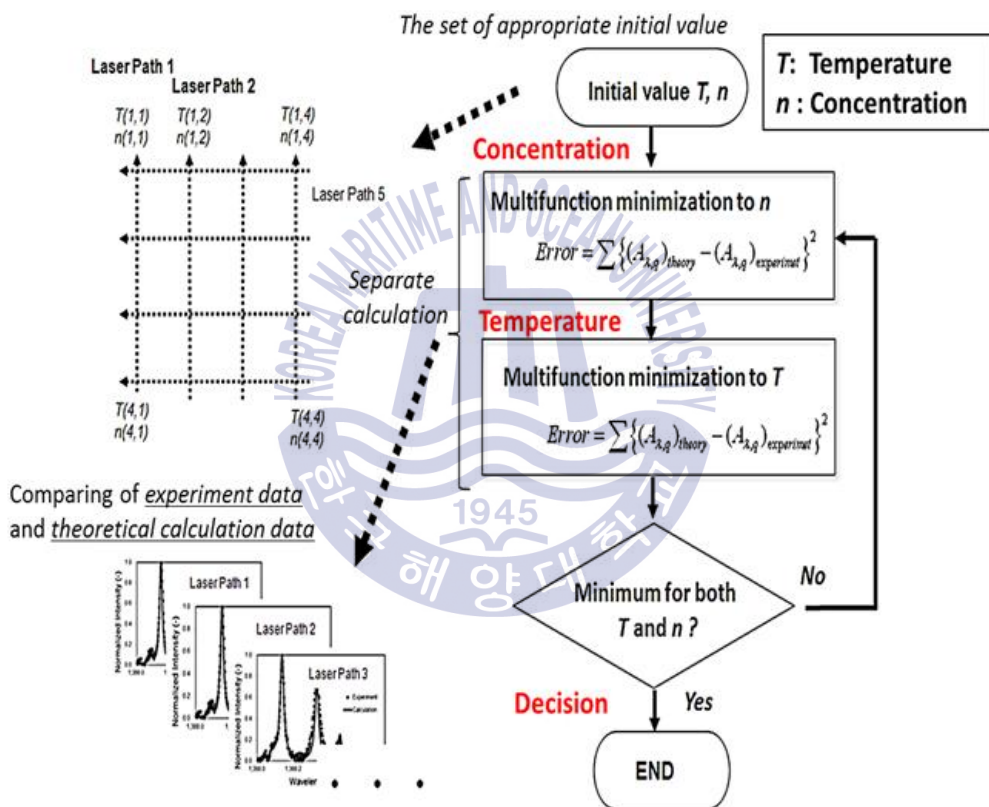


Fig. 2.12 CT analysis procedure

## 제 3 장 온도장 및 농도장 측정 개선법

### 3.1 ART, MART 재구성법

컴퓨터 단층촬영에 사용되는 반복계산 알고리즘은 대수적 영상구성기법에서 들 수 있다. 다양한 영상 재구성 기술의 알고리즘 중에서 일반적으로 ART법과 MART법이 사용되어지고 있다. 두 가지 해석법 모두 초기 값과 참조 값의 편차가 최소가 되도록 수렴할 때까지 반복적으로 계산하는 방법이다. ART법은 고전적으로 가장 많이 사용된 방법으로 초기 값과 참조 값은 교차하는 단면에서 배열들 간의 조합들은 연립방정식의 형태로 풀어지는 방법이다. 다음의 식 (3.1)은 흡수계수 값의 재구성에 적용된 ART 알고리즘이다.

$$\alpha_{\lambda,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{\lambda,j}(i)^{(k)} + \beta \left[ \frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}} - \sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,j}(i)^{(k)} \cdot L_{ij}}{\sum_{i=1}^I L_{ij}^2} \right] \quad (3.1)$$

여기서, 아래첨자  $\lambda$ ,  $i$ ,  $j$ 는 파장, 셀 번호와 레이저 path번호이다.  $k$ 는 반복계산 횟수를 나타내고,  $\beta$  (Relaxation parameter)는 수렴속도에 영향을 주는 가중치이다.  $\beta$  값은 0 ~ 1 사이의 값을 가지는데, 본 연구에서는 최적화된  $\beta$  값으로 0.1을 사용하였다. 가로와 세로레이저 순서로 위

의 식을 이용해 재건계산을 실시한다. 새로운 흡수계수  $\alpha_j(i)^{(k+1)}$  값으로 갱신되면, 새로운 흡수량을 구하여 Fig 2.10과 식 (2.28)을 이용하여 새로운 온도 값과 농도 값을 얻는다. 이와 같은 방법으로 계산된 흡수량 값이 목표 흡수량 값 (측정 값)에 수렴할 때까지 반복 계산하여 오차가 최소일 때의 온도 값과 농도 값을 구한다. 이는 다른 재건 방법에 비해 재구성 과정에서 이전의 정보를 통합하기가 상대적으로 쉽지만, 초기 값과 목표 값의 오차가 큰 경우에는 가중치를 곱해주는 연산에도 불구하고 수렴 속도가 늦은 단점이 있다.

MART법은 목표 값과 계산된 값의 비를 이용하는 배수적 계산방법을 이용하기 때문에, ART법에 비해 빠른 수렴 계산 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 식 (3.2)는 흡수계수 값의 재구성에 적용된 MART법의 계산식을 나타낸다.

$$\alpha_{\lambda,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{\lambda,i}(i)^{(k)} \times \left[ \frac{(A_{\lambda,j})_{\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{\lambda,i} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (3.2)$$

본 논문에서는 선행연구를 통하여 MART법이 ART법보다 더 좋은 재구성 성능을 나타냈으므로 MART법을 사용하였다<sup>[14]</sup>.

### 3.2 초기 값 개선

적절한 초기 온도와 농도 값의 산정은 토모그래피 계산결과에 영향을 미치는 요소 중 하나로써, 부적절한 초기 값의 산정은 발산하는 방향으로 계산을 이끌게 된다. 특히, 미지의 온도 및 농도 분포장에서 적절한 초기 값을 정한다는 것은 쉽지 않을 것이다. 그렇다고 임의로 초기 값을 산정하여 수렴 계산을 이끈다는 것은 많은 시행착오가 걸리며, 또한 많은 시간이 소요될 것이다. 본 연구에서는 PLOS (Plus line of sight)법과 MLOS (Multiple line of sight)법<sup>[15]</sup>을 이용하여 쉽게 수렴 계산이 가능한 초기 값을 산정하였다. 이는 각 셀을 교차하는 레이저들의 파장 #1, #2의 통합된 흡수량의 비를 계산하여 Fig. 2.10의 강도의 비를 이용하여 초기온도를 산정하는 방법으로 아래의 식과 같이 나타낸다.

$$R_{PLOS} = \frac{A_{\#1,p} + A_{\#1,q}}{A_{\#2,p} + A_{\#2,q}} \quad (3.2)$$

$$R_{MLOS} = \frac{A_{\#1,p} \times A_{\#1,q}}{A_{\#2,p} \times A_{\#2,q}}$$

여기서, 아래첨자  $p$ ,  $q$ 는 가로와 세로 레이저 빔이고,  $R_{PLOS}$ 는 각 셀에서 그 셀을 교차하는 빔들의 파장 #1, #2의 흡수량의 합의 통합 비로 나타낸 값이고,  $R_{MLOS}$ 는 파장 #1, #2의 흡수량의 곱의 통합 비로 나타낸 값

을 나타낸다. 121개의 모든 셀마다 통합된 흡수량의 비를 구한 후, 온도로 변환하면 모든 셀들의 초기치 온도를 산정할 수 있게 된다. 본 논문에서는 가로, 세로 두 개의 레이저 정보로 초기온도를 산정하였지만, 교차하는 레이저의 정보가 더 많다면 더 정확한 초기온도를 산정할 수 있을 것이다.

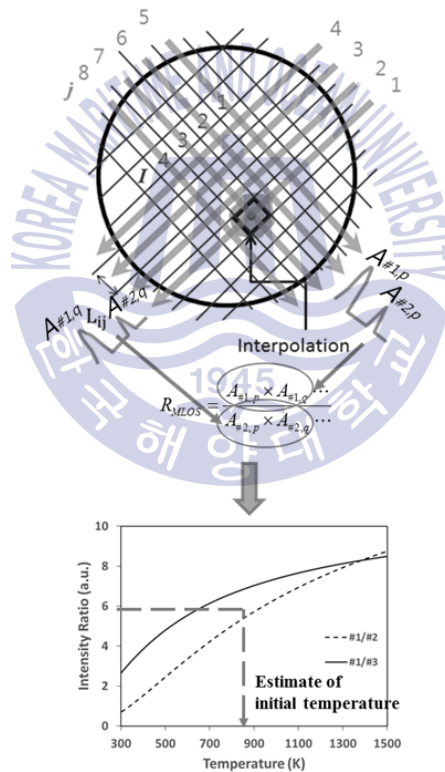


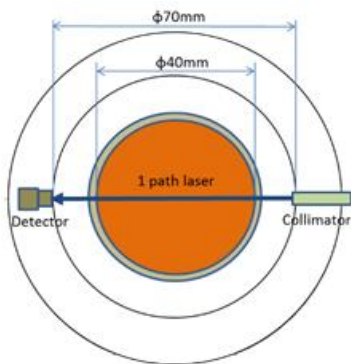
Fig. 3.1 Estimate process of initial temperature

### 3.3 실험적인 선폭 함수의 개선

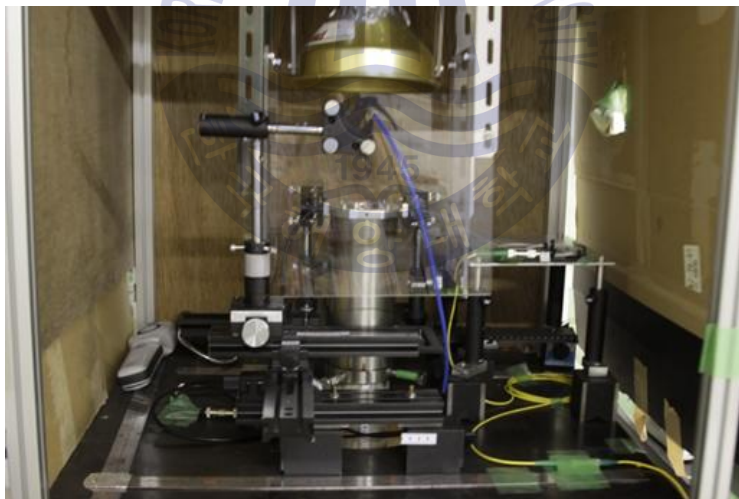
#### 3.3.1 Flat plate burner 실험장치

본 연구에서 사용되는 선폭확장은 도플러와 선형충돌에 의한 선폭확장의 혼합형인 Voigt 선형함수를 이용하는데, 앞의 식 (2.17)에서 충돌에 의한 선폭확장 계수  $\gamma_j[cm^{-1}atm^{-1}]$ 는 실험에 의한 값으로 구해야 한다. 따라서 정확한 선폭함수 계수를 구하기 위하여 Flat plate burner를 사용하여 일정한 온도구배 상태에서 흡수신호 값을 측정하였고, 이론적으로 구한 스펙트럼 그래프와 커브피팅을 하여 선폭확장 계수 값을 정하였다. Fig. 3.2 (a)는 이 실험에 사용된 1 path 레이저와 셀을 보여주고 있으며, Fig. 3.2 (b)는 실제 Flat plate burner 실험 장치도를 보여주고 있다. H<sub>2</sub>O의 1388nm 흡수스펙트럼을 측정하기 위해서, 주사범위 0.6nm의 NTT Electronics사 모델명 NLKE5GAAA의 DFB 반도체 레이저를 사용하였고, 레이저의 스캔 주파수는 1kHz로 설정하였다. 레이저 신호는 Hamamatsu Photonics사 모델명 G8370-01의 포토다이오드에서 검출된다. 검출된 신호는 HIOKI사 8861 Memory Highcoda HD Analog16의 데이터레코더에서 500kHz, 즉 1스캔당 500개의 데이터로 저장되었다.





(a) Measurement cell of 1 path laser



(b) Experimental equipment

Fig. 3.2 Experimental equipment of the flat plate burner

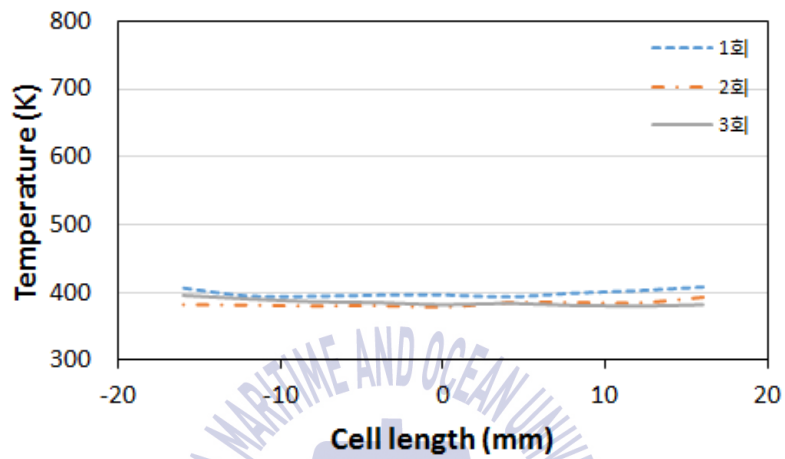


### 3.3.2 온도 일관성 실험

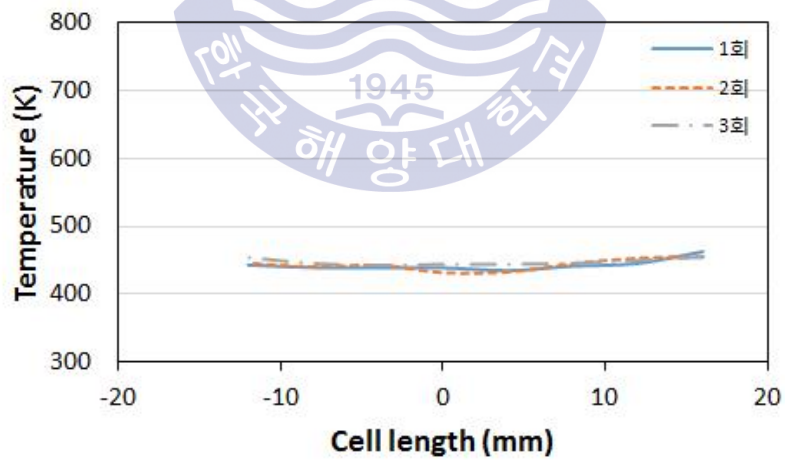
버너의 연소 온도장이 실험할 때마다 일관성 있게 일정한 온도가 유지되어야 레이저 실험의 흡수신호 값의 데이터가 신뢰도가 높게 된다. 따라서 레이저 실험에 앞서 버너 온도장의 일관성 테스트를 실시하였다. Fig. 3.3은 400K ~ 700K의 온도구간에서 총 3회 동안 실시한 온도 일관성 실험의 결과를 보여준다. X축은 버너 중심으로부터 떨어진 거리를 나타내며, Y축은 서모커플로 측정된 온도를 나타낸다. 총 34mm 길이의 해석영역에서 2mm 단위로 이동시켜가며 총 17 point에서 온도측정을 하였으며, 각각의 온도 구배 영역에서 온도가 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

### 3.3.3 흡수 스펙트럼 분석

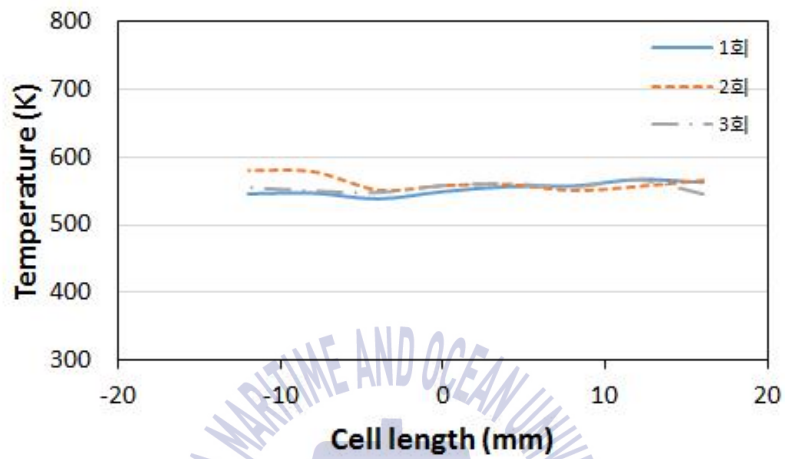
온도 일관성 테스트 완료 후, 동일한 상태의 각각의 온도 조건에서 1 path 레이저를 이용하여 흡수 실험을 하였다. Fig. 3.4는 각각의 온도별로 1388nm 영역대의  $H_2O$  흡수스펙트럼의 그래프를 나타내고 있다. 이 실험으로 구한 그래프와 HITRAN2008 database<sup>[13]</sup>를 이용하여 계산된 스펙트럼 그래프는 1로 정규화 (Normalization) 시키는 과정을 거쳐서 최소자승법 (Least Mean Squares)에 의해 커브피팅을 하였다.



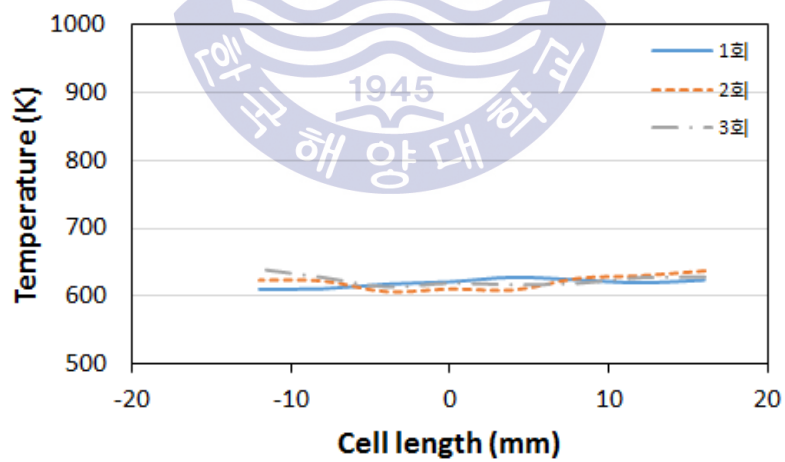
(a) 400K



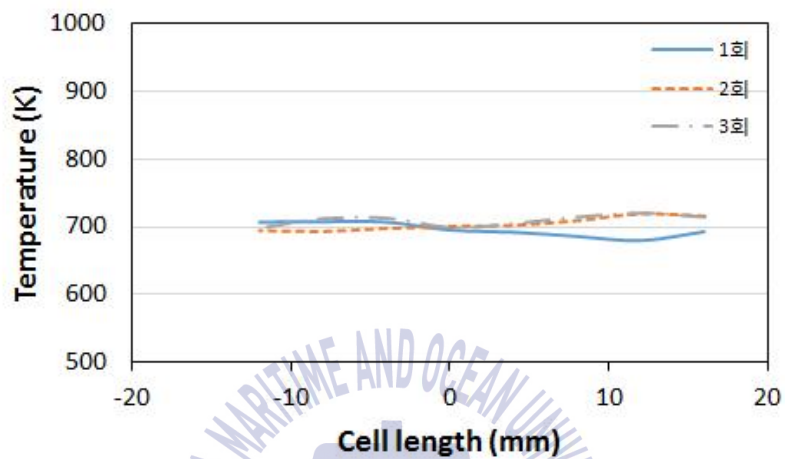
(b) 450K



(c) 550K

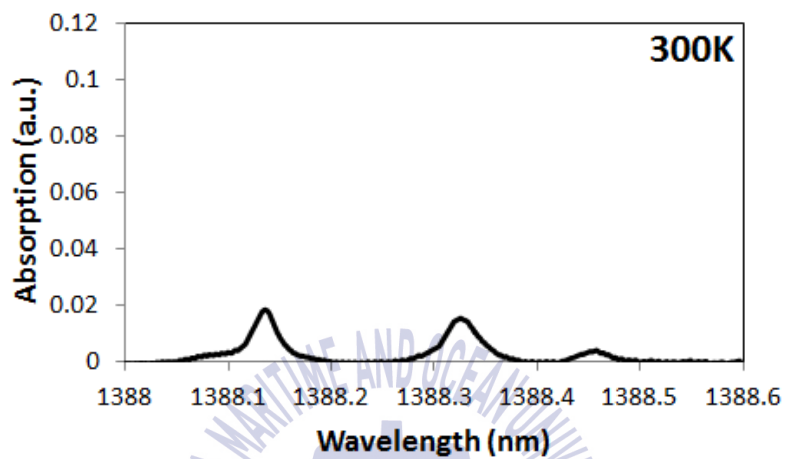


(d) 600K

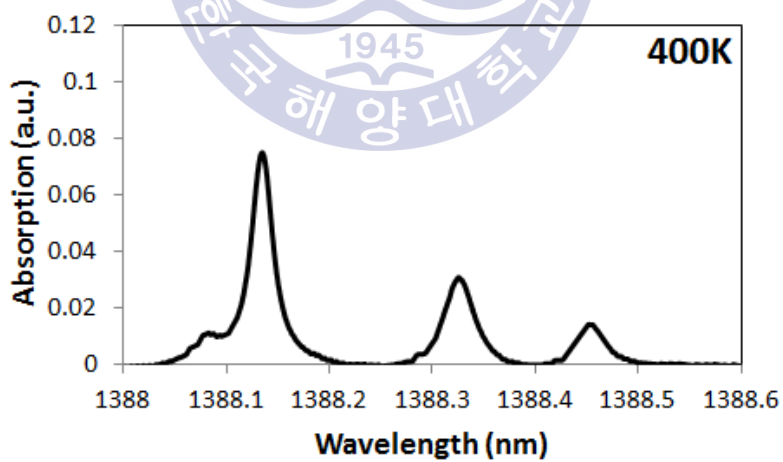


(e) 700K

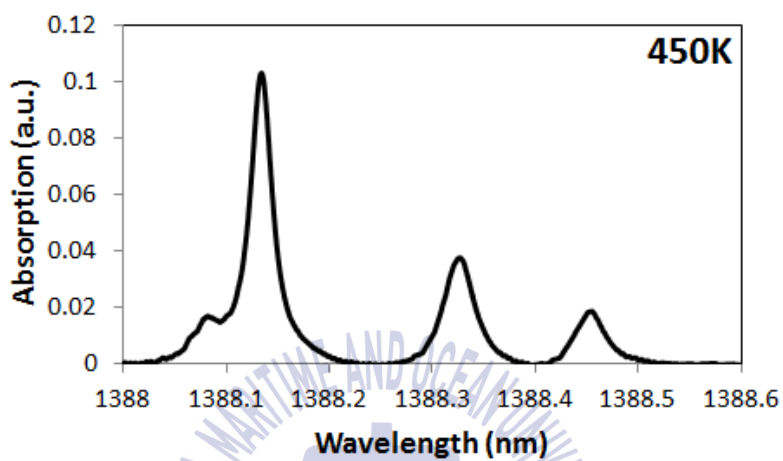
**Fig. 3.3** Results of experimental repeatability using flat plat burner at the different temperature



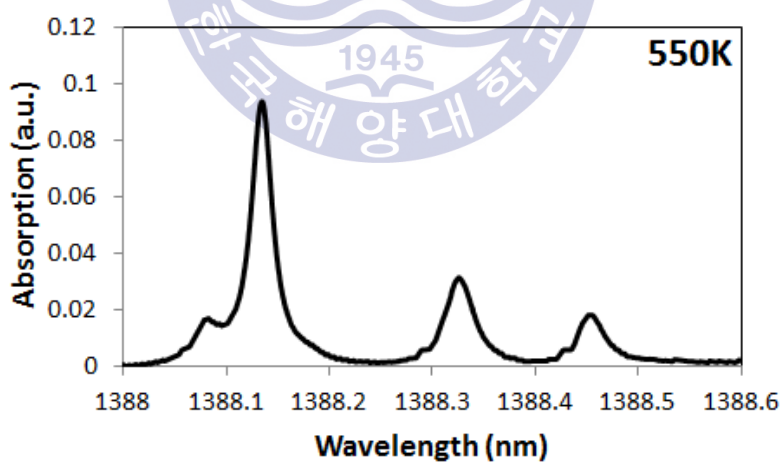
(a) 300K



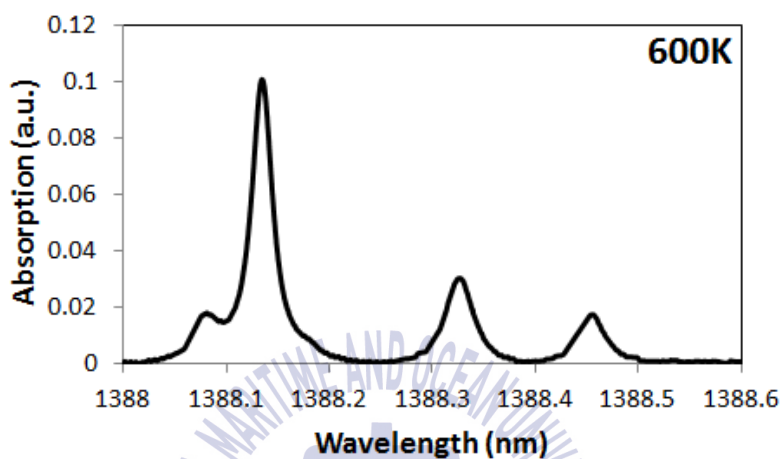
(b) 400K



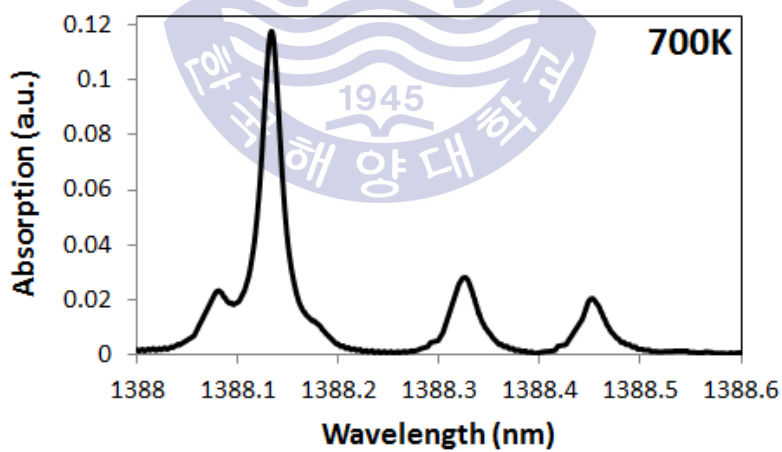
(c) 450K



(d) 550K



(e) 600K

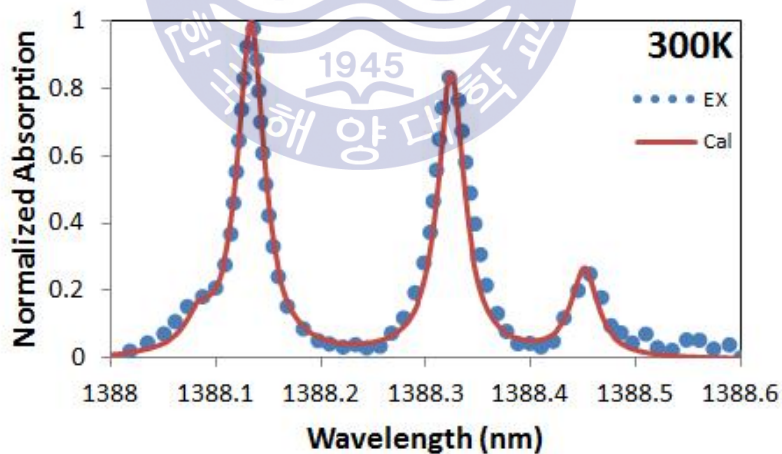


(f) 700K

Fig. 3.4 Experiment absorption spectrum of  $\text{H}_2\text{O}$  at 1388.0~1388.6nm

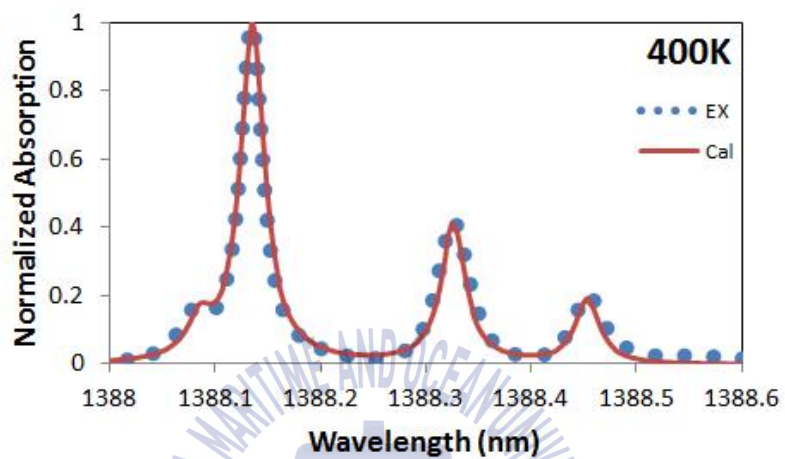
### 3.3.4 선폭계수의 선정

선폭계수를 선정하기 위해 식 (2.17)의 미지수  $\gamma_j(T_0)$ 와  $n_j$ 의 값을 구하여야한다. Fig. 3.4의 각각의 온도에서 구해진 흡수스펙트럼 그래프를 사용하여  $0 < \gamma_j(T_0) < 1$  와  $0 < n_j < 1$  범위에서 최소자승법을 이용하여 이론적으로 계산된 스펙트럼 그래프와 커브피팅을 시킨 결과,  $\gamma_j(T_0)=0.16$ ,  $n_j=0.37$ 에서 최소오차를 나타냈다. 따라서 본 연구에서는 Voigt 함수를 이용한 선폭계수를 위의 값으로 사용하였다. Fig. 3.5는 실험 그래프와 이론적으로 계산된 그래프를 정규화를 시켜서 최종 수립된 스펙트럼의 커브피팅 결과를 보여준다.

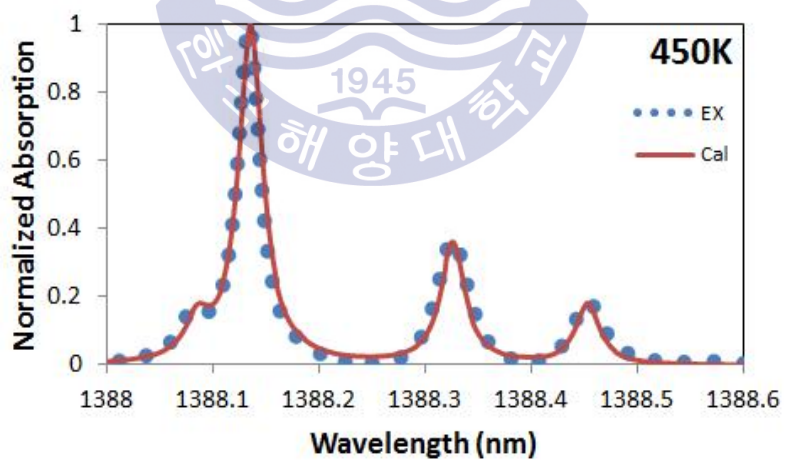


(a) 300K

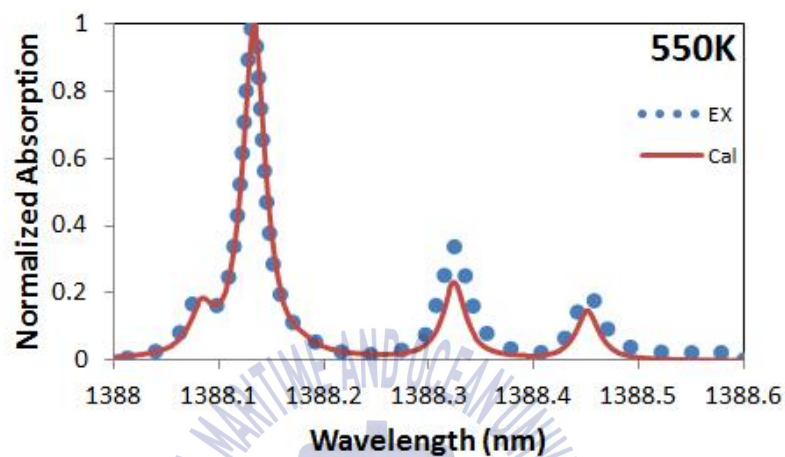




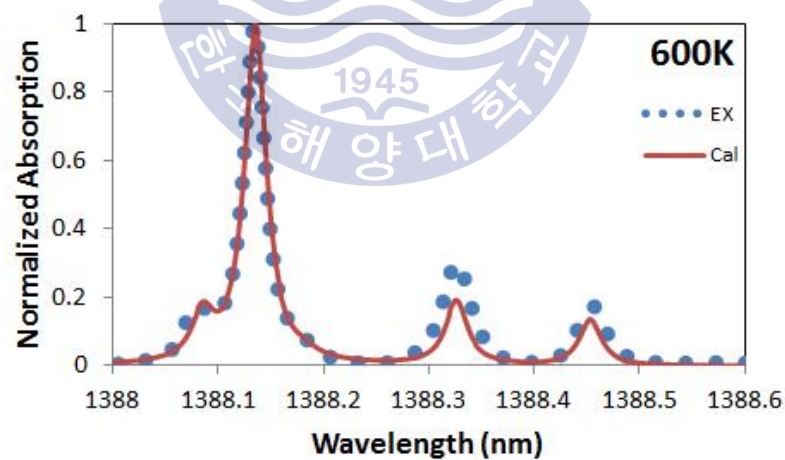
(b) 400K



(c) 450K



(d) 550K



(e) 600K

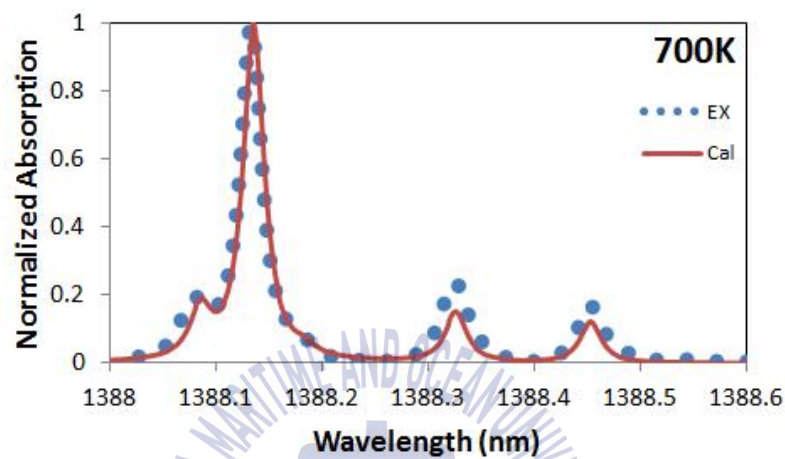


Fig 3.5 Curve fitting results of normalized absorption spectrums from calculation and experiment

## 제 4 장 재구성 알고리즘 개발

### 4.1 세 파장 계수비교를 이용한 Fitting

토모그래피 온도장 재건 알고리즘으로 두 파장 이용 방식이 일반적으로 사용되어져 왔다<sup>[16]-[19]</sup>. 두 파장 이용 방식은 두 파장의 최대 흡수량 값의 비를 이용하여 온도를 재건하는 알고리즘으로 피크값 만을 이용하기 때문에 정확한 Fitting에 한계를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 파장을 추가시켜 세 파장 계수비교를 이용한 Fitting법을 제안한다. 이는 선정된 세 파장에서의 최대 흡수량 값을 이용하여 두 종류의 강도 비를 통해 각각의 온도의 평균값으로 재건하는 알고리즘이다. 가상의 온도장과 실제의 버너실험에 의한 온도장에 적용시켜 봄으로 성능평가를 실시하였다.

#### 4.1.1 가상의 2D 온도분포 만들기

개발된 알고리즘을 가상의 온도 분포장에 적용시키기 위해 가우시안 함수 (Gaussian function)를 사용하여 실제 온도분포와 유사한 가상의 온도 분포를 만들었다. 식 (4.1)은 사용된 가우시안 함수식을 나타낸다.

$$T_{i,j} = T_0 + D \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

여기서,  $x$ 는 X축방향의 거리를,  $y$ 는 Y축방향의 거리를 나타내고,  $x_0$ ,  $y_0$ 는 중심부의 위치를 나타낸다.  $T_0$ 는 최저온도를 나타내며, 본 연구에서는 300K를 사용하였고,  $D$ 는 온도편차,  $\sigma$ 는 분포도의 경사도를 결정하는 수치이다. 식 (4.2)는 두 개의 가우시안 함수를 이용하여 만들어진 혼합형의 온도분포 함수식을 나타낸다.

$$T_{i,j} = T_0 + D_1 \cdot \exp\left(-\frac{\{(x-x_o)_1\}^2 + \{(y-y_o)_1\}^2}{\sigma_1^2}\right) + D_2 \cdot \exp\left(-\frac{\{(x-x_o)_2\}^2 + \{(y-y_o)_2\}^2}{\sigma_2^2}\right) \quad (4.2)$$

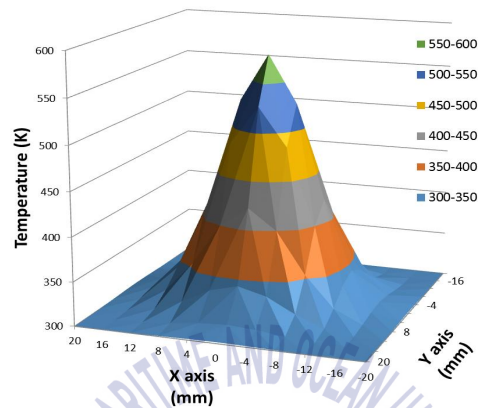
여기서, 아래첨자 1, 2는 두 개의 Vortex를 의미하며, 두 지점에서 온도 피크점이 있음을 의미하고 있다.  $D_1$ 과  $D_2$ 의 온도편차의 값에 의해서 최고 온도가 결정됨을 알 수 있다.

**Fig. 4.1(a)**는 식 (4.1)로부터 가우시안 분포로 만들어진 가상의 온도분포를 나타내며, 경계면 온도 300K, 최고온도는 580K이다. **Fig. 4.1(b)**는 식 (4.2)로부터 두 개의 혼합형 가우시안 분포로 만들어진 가상의 온도분포이며, 위 식들에서 사용된 파라미터들의 값은 **Table 4.1**에서 보여주고 있다, 중심부의 위치도 함께 나타내고 있다.

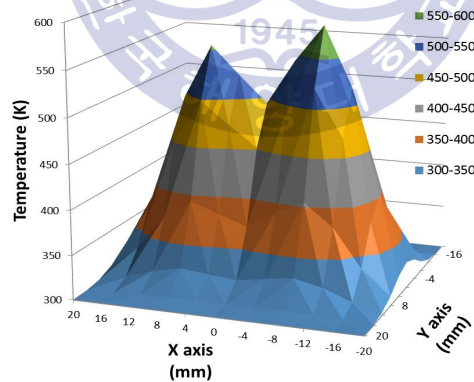
Table 4.1 Information of parameters used for two Gaussian functions

| Fig 4.1(a) | $X_0$ (mm) | $Y_0$ (mm) | Deviation of temperature ( $D$ ) | Sigma ( $\sigma$ ) |
|------------|------------|------------|----------------------------------|--------------------|
| Vortex 1   | 0          | 0          | 280                              | 8.0                |
| Fig 4.1(b) | $X_0$ (mm) | $Y_0$ (mm) | Deviation of temperature ( $D$ ) | Sigma ( $\sigma$ ) |
| Vortex 1   | -8         | 0          | 250                              | 8.0                |
| Vortex 2   | 8          | 0          | 280                              | 8.0                |





(a) Temperature distribution used by Gaussian function



(b) Temperature distribution used by superimposed two Gaussian functions

**Fig. 4.1** Phantoms for 2D temperature distribution

#### 4.1.2 격자 구성과 레이저 빔

Fig. 4.2는 해석 격자와 22개의 가상 레이저 빔을 2차원으로 배열시킨 단면도이다. 2차원 배열의 레이저 빔들은 가스의 단면 전체 (흡수매체)에 걸쳐서 배치되는데, 이들 배열의 교차점이 해석단위의 셀이 된다. 셀 영역을 지나가는 레이저 빔들의 흡수량은 식 (4.3)으로부터 구하였다.

$$A_j = \sum_i n_{i,j} L_{i,j} \alpha_{i,j} \quad (4.3)$$

여기서,  $A_j$ 는  $j$  레이저 빔의 흡수량이며, 레이저가 지나가는 셀들의 합으로 나타낸다.  $\alpha_{i,j}$ 는  $j$  레이저가 지나가는  $i$  셀에서의 선 강도와 선폭확장으로부터 구해진 흡수계수를 의미한다.

2차원 온도장의 영역은 121개의 정사각형 셀로 구성되어 있으며, 각각의 셀의 단위길이는 4mm이다. 가로 11개, 세로 11개의 가상레이저는 각 셀의 중심부를 통과하며, 일정한 간격으로 배치되어 있다.



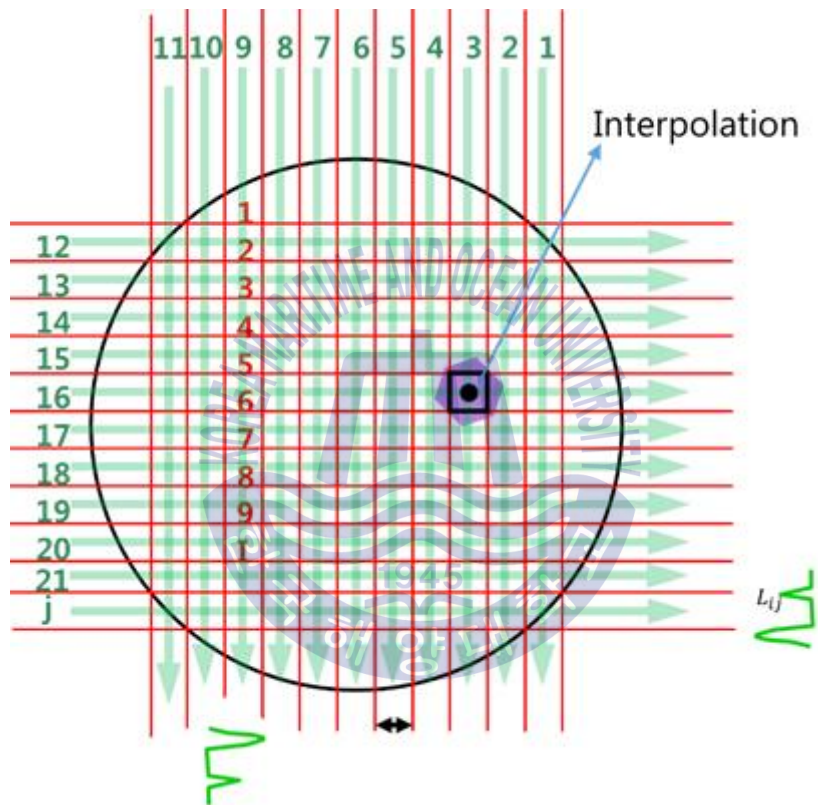


Fig. 4.2 Analysis grids and 22 beam paths

### 4.1.3 가상데이터의 재구성 온도분포 결과

토모그래피 재구성 방법으로 편차를 곱셈 수정벡터로 하며, 수렴속도가 빠른 MART법을 사용하였다. MART법을 이용하여 가상흡수량과 계산된 흡수량의 편차가 0에 가까워지도록 수렴할 때까지 반복 계산을 하였고, 재구성된 온도의 최종 수렴여부는 목표치흡수량과 계산된 흡수량의 차가 최소가 되도록 식 (4.4)와 같이 MSE 방식을 사용하였다.

$$Error = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \{(A_{\lambda,i,j})_{cal} - (A_{\lambda,i,j})_{pha}\}^2 \quad (4.4)$$

여기서,  $(A_{\lambda,i,j})_{cal}$ 는 계산된 흡수량을,  $(A_{\lambda,i,j})_{pha}$ 는 가상 레이저의 흡수량을 나타낸다. 수렴조건은  $10^{-10}$ 보다 작을 때까지 반복 계산을 한다. 수렴조건에서 재구성된 온도의 정확도를 평가하기 위하여 평균온도편차 (Average temperature deviation)를 아래의 식 (4.5)로 계산하였다.

$$eT = \frac{\sum_{i=1}^I |T_{cal,i} - T_{pha,i}|}{I} \quad (4.5)$$

여기서,  $eT$  값은 계산된 온도  $T_{cal,i}$ 와 가상설정온도  $T_{pha,i}$ 와의 평균 온도 편차를 나타내고,  $I$ 는 총 셀의 개수이다. 온도범위가 다양한 경우에서

보다 정확한 성능 평가를 위해 상대오차를 계산하여 비교할 필요가 있다. 상대오차는 식 (4.6)을 사용하여 계산하였다.

$$ReT = \frac{1}{I} \sqrt{\sum_{i=1}^I \left( \frac{T_{cal,i} - T_{pha,i}}{T_{max} - T_{min}} \right)^2} \quad (4.6)$$

여기서,  $T_{max}$ 는 가상온도장의 최대온도,  $T_{min}$ 은 가상온도장의 최저온도를 나타낸다.

Fig. 4.3은 서로 다른 4가지의 조건에서 계산된 eT 값의 결과를 보여준다. 두 파장 이용 방식과 세 파장 계수비교를 이용한 방식을 각각 PLOS법과 MLOS법으로 초기온도를 주었을 때, 재구성 온도의 결과를 비교한 것이다. Fig. 4.3(a)는 하나의 가우시안 함수를 사용한 가상 온도장에서 계산된 결과 값이고, Fig. 4.3(b) 혼합형의 가우시안 함수를 사용한 가상 온도장에서 계산된 결과 값이다.

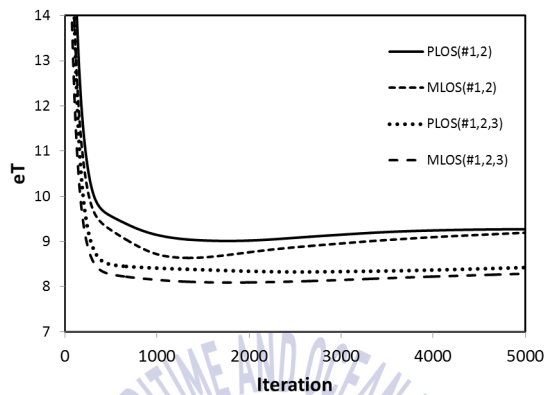
두 가지 가상 온도장에 적용해 본 결과, MLOS법과 세 파장 계수비교를 이용한 방식으로 온도를 갱신했을 때 평균온도편차가 최소로 나왔다. 초기 값 산정은 PLOS법보다 MLOS법이 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있었고, 세 파장 계수비교를 이용한 방식이 기존의 두 파장 이용 방식보다 더 나은 성능의 재건방법임을 알 수 있었다.

Fig. 4.4과 Fig. 4.5은 하나의 가우시안 분포와 혼합형의 가우시안 분포로

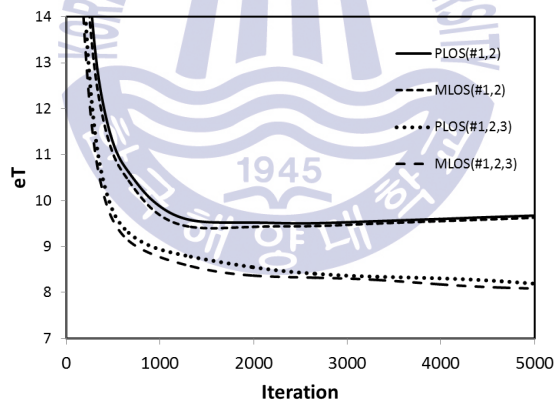
만들어진 가상 온도장에서 두 파장 이용 방식과 세 파장 계수비교를 이용한 방식으로 평균온도 편차가 최소일 때, 재구성된 온도분포의 결과이다. 모든 계산에서 초기 온도는 MLOS법을 사용하여 구하였고, 재구성 반복계산은 MART법을 사용하였다. 피크값만을 이용하기 때문에 적은 데이터 수로 인한 발산을 방지하기 위하여 경계조건 (Boundary condition)의 온도는 300K 이하로 떨어지지 않도록 설정하였다.

가상온도장과 재구성된 온도장의 절대온도 편차의 범위와 상대오차는 각각 Fig. 4.4(a)에서  $-2.7\text{K} \sim 64.9\text{K}$ , 0.0225, Fig. 4.4(b)에서  $-0.9\text{K} \sim 45.7\text{K}$ , 0.0189, Fig. 4.5(a)에서  $-24\text{K} \sim 45.9\text{K}$ , 0.02, Fig. 4.5(b)에서  $-18\text{K} \sim 35.5\text{K}$ , 0.019로 나타났다.

위의 결과로부터 가상 온도장을 이론적인 계산에 의해 재구성 온도분포를 구해 본 결과, MART법과 MLOS법과 세 파장 계수비교를 이용한 방식을 조합했을 때 가장 좋은 재구성 온도산정 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

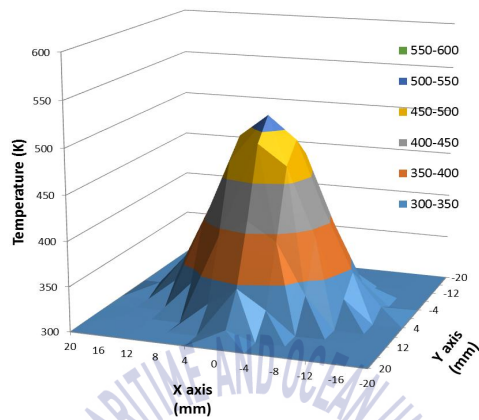


(a) PLOS and MLOS methods at one Gaussian function

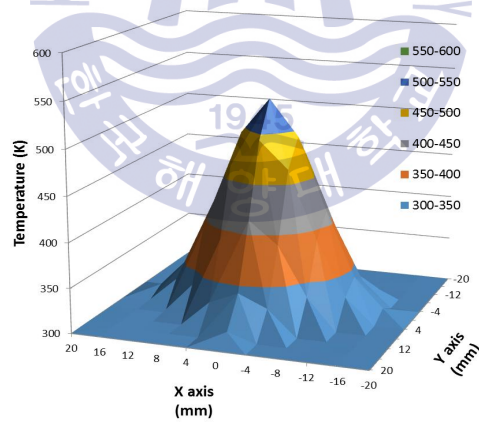


(b) PLOS and MLOS methods at superimposed two Gaussian functions

**Fig. 4.3** The average deviation of phantom and calculation temperature

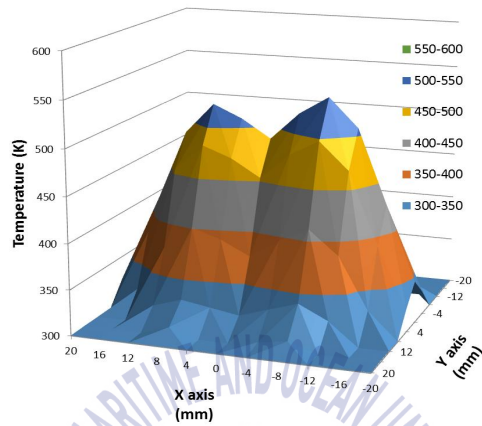


(a) one ratio of two-peaks

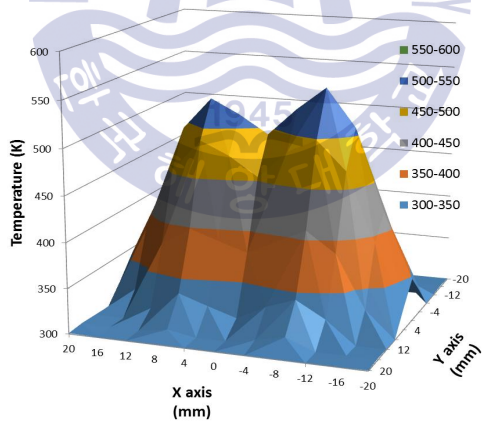


(b) two ratios of three-peaks

Fig. 4.4 Reconstructed 2D temperature distribution calculated at one Gaussian function



(a) one ratio of two-peaks



(b) two ratios of three-peaks

Fig. 4.5 Reconstructed 2D temperature distribution calculated at superimposed two Gaussian functions

#### 4.1.4 분젠 타입 버너 실험 장치

Fig. 4.6는 10개의 레이저 빔을 이용한 버너실험 장치도를 나타낸다.  $H_2O$ 의 1388nm 흡수스펙트럼을 측정하기 위해 주사범위 0.6nm의 동일한 DFB 반도체 레이저를 사용하였고, 레이저의 스캔 주파수는 1kHz로 설정하였다.

레이저광은 OPNETI사의 모델명 SMF-28e 1310nm SWBC  $1 \times 16$ 의 빔 스플리터에 의해서 10 개의 빔으로 분리되어지고, 분리된 레이저 신호는 포토다이오드에서 검출된다. 검출된 10개의 레이저 신호는 데이터레코더에 실시간으로 저장된다. 셀의 측정영역은 40mm이며, 메탄가스를 연료로 사용한 분젠 (Bunsen) 타입의 버너를 이용하였다.

연소 불꽃은 측정영역 셀의 중앙에 위치하였고, 안정적인 완전연소를 위하여 메탄가스와 공기의 유속을 각각 30  $\ell/\text{min}$ , 102  $\ell/\text{min}$ 로 일정하게 유지시켰으며, 계산에 의해서 재구성된 온도와의 검증을 위해 직경 100  $\mu\text{m}$ 의 서모커플을 이용해서 가로와 세로  $24 \times 24$  (576개) 셀의 구간에서 온도 측정 실험을 하였다.



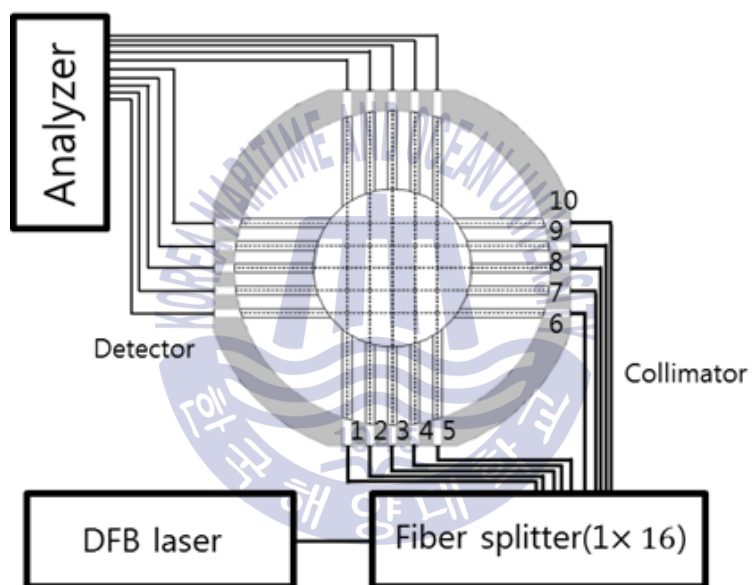


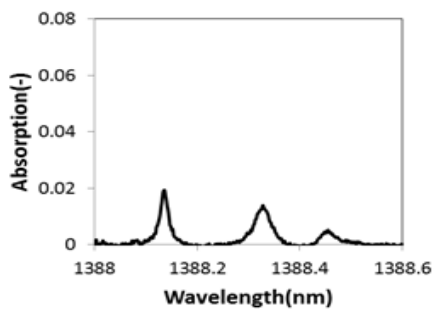
Fig. 4.6 The schematic experimental setup with 10 beams

#### 4.1.5 실험 결과

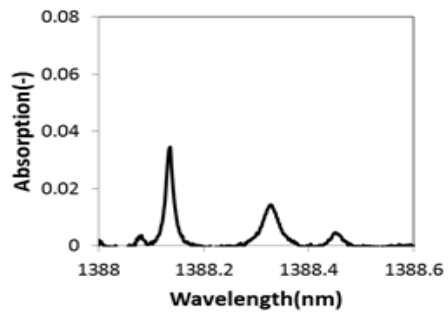
모든 레이저신호를 흡수 스펙트럼으로 변형시킬 때, 레이저 빔 스티어링에 의한 노이즈를 제거하기 위하여 Polynomial noise reduction technique<sup>[12]</sup>을 사용하였다.

10 path 레이저는 동시측정이 되었으며, Fig. 4.7에서 파장 1388nm ~ 1388.6nm의 H<sub>2</sub>O 흡수스펙트럼 결과를 보여주고 있다. 저온영역은 레이저 path 1, 5, 6, 10이 지나가고, 중간온도영역은 레이저 path 2, 4, 7, 9가 지나가며, 고온영역은 레이저 path 3, 8이 지나간다. 각 온도영역별로 계측된 스펙트럼의 최대 피크 (Peak)값들은 유사한 스펙트럼 형상을 가지고 있음을 알 수 있다.

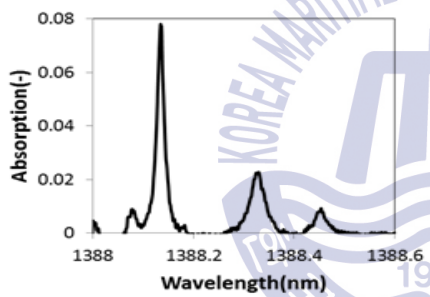
Fig. 4.8은 서모커플을 이용하여 버너의 배기가스의 온도분포를 측정한 결과이다. 버너불꽃은 측정영역의 중앙부 (X=0, Y=0)에 위치해 있고, 서모커플을 2mm 간격으로 이동하면서 측정영역의 전 구간에 걸쳐서 온도를 측정하였다. 최고온도는 중앙부 위치에서 약 1110K이었으며, 경계영역의 온도는 약 300K을 유지하였다.



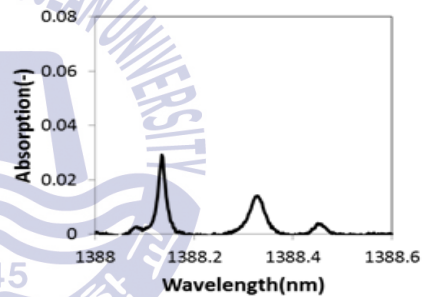
(a) Laser path 1



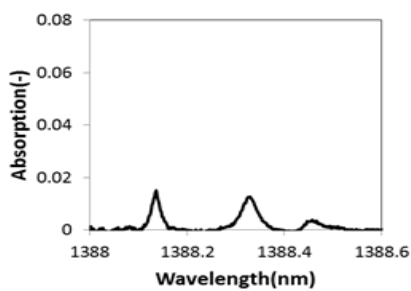
(b) Laser path 2



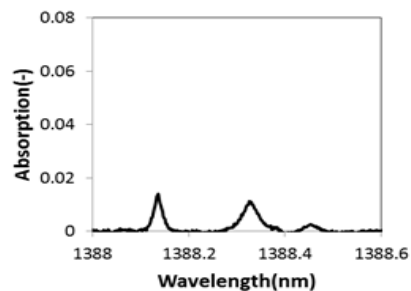
(c) Laser path 3



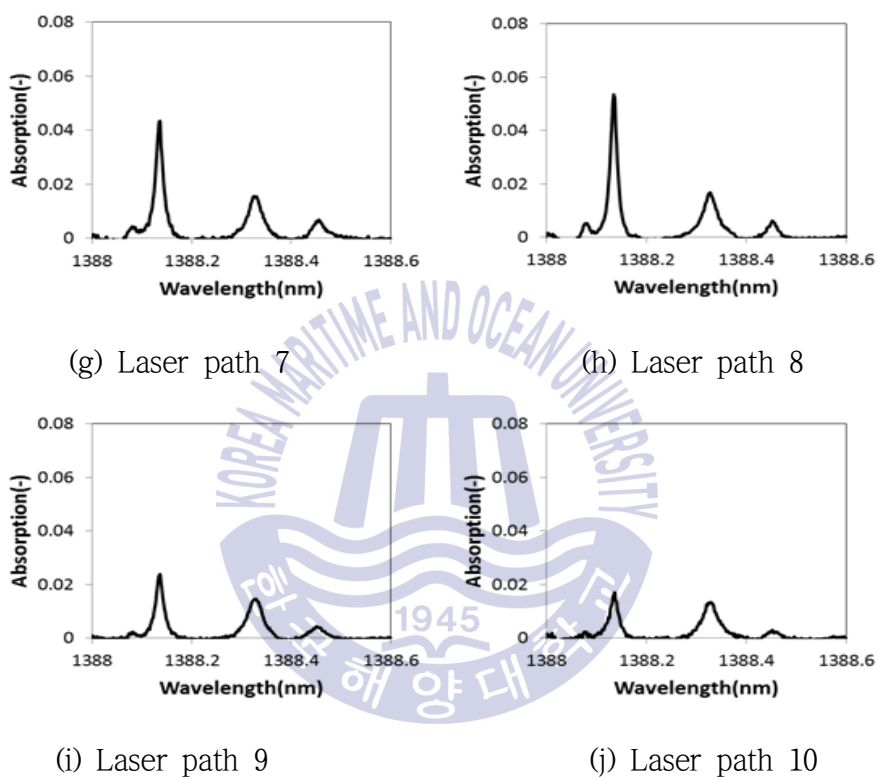
(d) Laser path 4



(e) Laser path 5



(f) Laser path 6



**Fig. 4.7** Absorption spectrums of  $\text{H}_2\text{O}$  with 10 path lasers

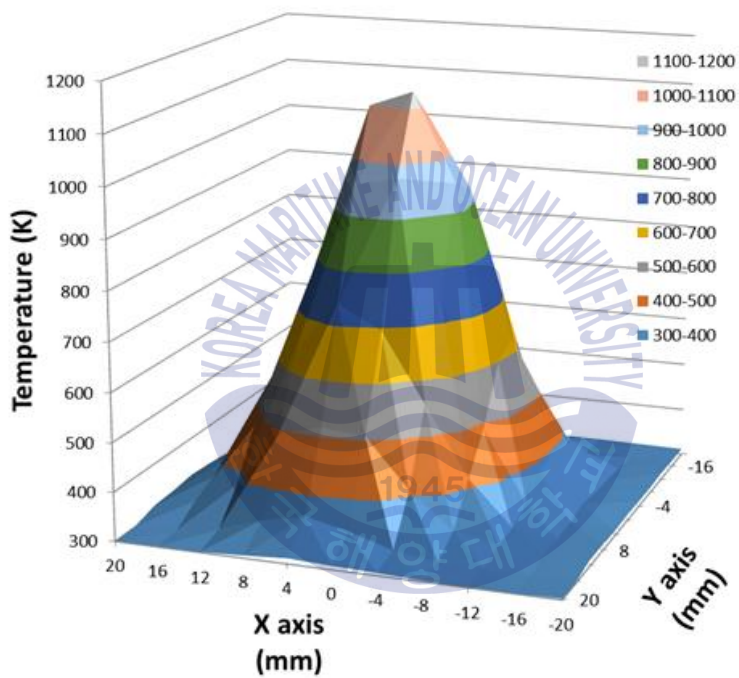


Fig. 4.8 2D temperature distributions measured by thermocouple

#### 4.1.6 실험데이터의 재구성 온도분포 결과

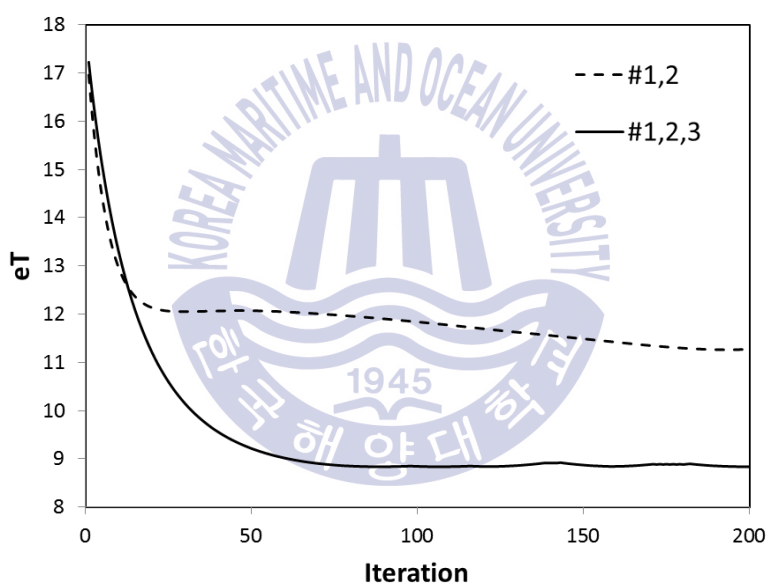
10path의 레이저 빔을 사용하여 가로와 세로  $11 \times 11$  격자 영역을 해석하기에는 공간분해능이 떨어질 수밖에 없다. 따라서 레이저실험으로부터 얻는 10path의 데이터로부터 거리역수 보간법<sup>[16]</sup>을 사용하여 12개의 가상레이저를 추가하였다. 재구성 계산의 초기온도는 MLOS법을, 재건계산은 MART법을 사용하였다. 신호 값의 커브피팅은 가상 온도장에서와 동일하게 두 파장 이용 방식과 세 파장 계수비교를 이용한 방식으로 수렴할 때까지 반복 계산을 하여 결과를 비교하였다.

Fig. 4.9는 실험데이터를 이용한 두 파장 이용 방식과 세 파장 계수비교를 이용한 방식의 평균온도편차의 결과이다. 가상의 온도장에서와 마찬가지로, 실험데이터에 적용 시켰을 때에도 세 파장 계수비교를 이용한 방식이 두 파장 이용 방식보다 더 좋은 결과를 보였다.

Fig. 4.10은 실험데이터를 이용하여 수렴되었을 때의 재구성 온도분포 결과이다. Fig. 4.10(a)는 두 파장 이용 방식으로 계산된 결과이며, Fig. 4.8의 서모커플로 측정한 2차원 온도장과 비교했을 때, 중심부 ( $X=0$ ,  $Y=0$ )인 고온영역에서 오차가 크게 발생하였다. 반면에 Fig. 4.10(b)에서는 온도분포의 기울기가 전체적으로 급한 형태로 중간부의 온도가 안 맞았으나, 고온부는 비교적 잘 맞았으며, 두 파장 이용 방식보다 더 적은 오차를 보였다. 적절한 가우시안 필터 (Gaussian filter)를 통해 급한 기울기 형태는 보완

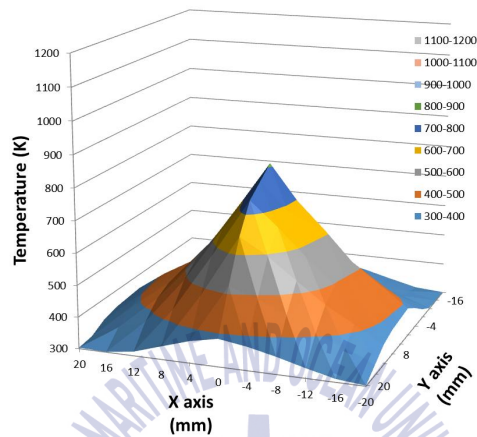
가능하나, 가우시안 필터의 사용은 고온부의 온도를 떨어지게 만들므로 오차를 증가시키는 단점이 있다. 향후 적절한 가우시안 필터를 적용시키는 방법에 관한 연구가 필요할 것으로 보인다. 서모커플 측정 온도와 재구성된 온도와의 절대 온도오차 범위와 상대오차는 두 파장 이용 방식에서는  $-191 \sim 417\text{K}$ 와  $0.107$ 이고, 세 파장 계수비교를 이용한 방식에서는  $-185 \sim 161\text{K}$ 와  $0.098$ 이었다.

이를 통해, 두 파장 이용 방법보다 세 파장 계수비교를 이용한 방식이 이론 및 실험적으로 더 좋은 재건계산 성능을 보임이 증명이 되었다. PLOS와 MLOS방법으로 초기치 설정이 가능하였으며, 성능평가의 계산 결과, MLOS (Multiple line of sight) 방법이 조금 더 좋은 결과를 나타내었다. 또한, MART법과 MLOS (Multiple line of sight) 방법과 세 파장 계수비교를 이용한 방식을 조합하여 2차원 온도장의 해석을 했을 때, 가장 좋은 온도분포 산정 결과를 나타내었다. 그리하여, 흡수량의 최대값의 비 정보를 더 많이 이용하면, 더 좋은 재구성 계산 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

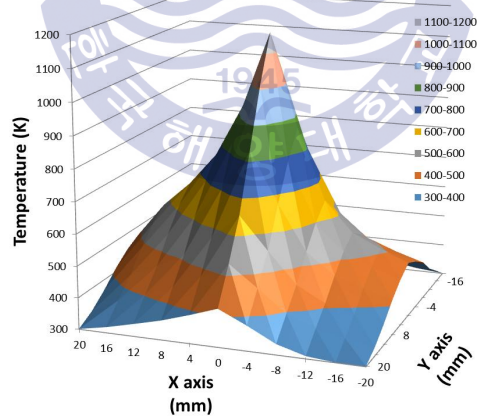


**Fig. 4.9** Comparison of the average temperature deviation by using one ratio of two-peaks(#1,2) and two ratios of three-peaks(#1,2,3) methods





(a) 2D temperature distribution by using one ratio of two-peaks



(b) 2D temperature distribution by using two ratios of three-peaks

**Fig. 4.10** Results of reconstructed 2D temperature distribution

## 4.2 Full-Profile 상호상관계산 알고리즘

일반적인 CT-TDLAS 해석방법으로 가스의 특정파장에서의 레이저빔 흡수강도의 최대값들의 비를 이용한다. 이 방법은 온도의 고온부나 중간부에서의 오차가 발생하게 되고, 노이즈가 포함된 측정신호로부터 정확한 최대값을 찾아내기 용이하지 않다는 단점이 있다. 이 장에서는 특정파장에서만의 레이저빔 흡수강도의 최대값 대신에 모든 파장에서의 흡수강도 신호들의 패턴을 매칭시킴으로 온도분포를 재구성할 수 있는 새로운 계산 알고리즘에 대해 설명한다.

### 4.2.1 패턴매칭 (pattern matching) 방법

패턴매칭을 수행하기 위해서는 벡터의 길이를 1로 만드는 정규화 과정을 거쳐야한다. 이는 일반적으로 평균을 빼고, 표준편차를 나누어 주는 것으로 모든 단계에서 적용된다. 다음으로 상관량을 구해야 하는데, 템플릿  $t(x,y)$ 와 레퍼런스  $f(x,y)$ 의 정규화된 상호상관 (Normalized cross-correlation)은 식 (4.7)과 같다.

$$\frac{1}{n} \sum_{x,y} \frac{(f(x,y) - \bar{f}) \cdot (t(x,y) - \bar{t})}{\sigma_f \sigma_t} \quad (4.7)$$

여기서,  $n$ 은  $t(x,y)$ 와  $f(x,y)$ 에서의 픽셀의 수,  $\bar{f}$ 는  $f$ 의 평균,  $\sigma_f$ 는  $f$ 의 표준편차를 나타낸다. 정규화된 벡터를 각각  $F$ 와  $T$ 라 할 때,  $F(x,y)=f(x,y)-\bar{f}$ ,  $T(x,y)=t(x,y)-\bar{t}$ 이면 합은  $\langle \frac{F}{\|F\|}, \frac{T}{\|T\|} \rangle$  와 같다.  $\langle, \rangle$ 는 내적을 의미하며,  $\| \cdot \|$ 는 기하학 벡터의 최대값이다. 위의 과정을 통해 두 함수간의 상관량을 측정하고, 기하학 상관량의 최대값을 얻게 된다. 본 연구에서는 HITRAN 흡수그래프 패턴과 가상 흡수그래프 패턴과의 패턴매칭을 통해 추적함으로써 온도를 구하는 방식인데, 식 (4.7)을 응용한 다음의 식 (4.8)과 같이 나타낸다.

$$C_{\alpha,t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha}_i) \cdot (t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}} \quad (4.8)$$

여기서, 아래첨자  $i$ 는 측정영역에서의 파장값으로 1388.0 ~ 1388.6nm를 약 340 등분하여 사용하였으며,  $\alpha$ 는 계산된 흡수값,  $t$ 는 주어진 온도에서의 이론 흡수값이며,  $C$ 는 상호상관 계수값이며, 완전히 같은 패턴이면 1, 완전히 반대 패턴이면 -1의 값을 가진다. 모든 온도에 대해 상호상관을 계산 후 패턴이 제일 유사한 최대값을 구하였다. 또 구한 값은 5K 간격의 테이블에서 얻어진 값이므로 주위 값을 이용한 2차 커브피팅을 사용하여 최적의 온도 값을 구하였다.

온도분포의 재구성에 있어서 수렴여부를 판단하기 위해서 식 (4.4)를 이

용하였으며, 오차계산에서의 수렴조건으로서 계산된 온도 값의 변화가  $10^{-20}$ 보다 적으면서 그 값이 변하지 않을 때까지 반복계산을 수행하였다. 수렴조건을 만족하지 않을 경우, 구해진 온도 값을 이용하여 새로운 흡수 값을 구하고, 셀에서의 흡수값과의 오차의 10% 만큼 셀에서의 흡수계수를 수정하였고, 다시 수렴될 때까지 반복 계산을 수행하였다.

**Fig. 4.11**은 실제 계산 프로그램에 의해 패턴 매칭되는 과정을 보여주고 있다. 반복계산 10회, 30회, 100회까지 진행될수록 알고리즘에 의해서 패턴 매칭이 형성되고 있음을 볼 수 있다.

**Fig. 4.12**는 온도변화에 따른 패턴 변화의 형상을 보여준다. 저온부에서 패턴형상이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 고온부보다 저온부 영역에서 더욱 정확한 재구성 해석이 가능함을 의미한다. 이러한 패턴형상들의 정보를 이용하여 **Fig. 4.11**의 패턴 매칭 과정을 거쳐 최적화 패턴 형상을 찾을 수 있다.

**Fig. 4.13**은 상호상관 계산 알고리즘의 전체 흐름도를 보여주고 있다. 그림과 같은 단계를 거치면서 오차가 최소가 될 때 각 셀들의 최적의 흡수 계수 값이 구해지며, 그 때 최종적으로 재구성된 온도분포를 산출하며 프로그램은 종료된다.

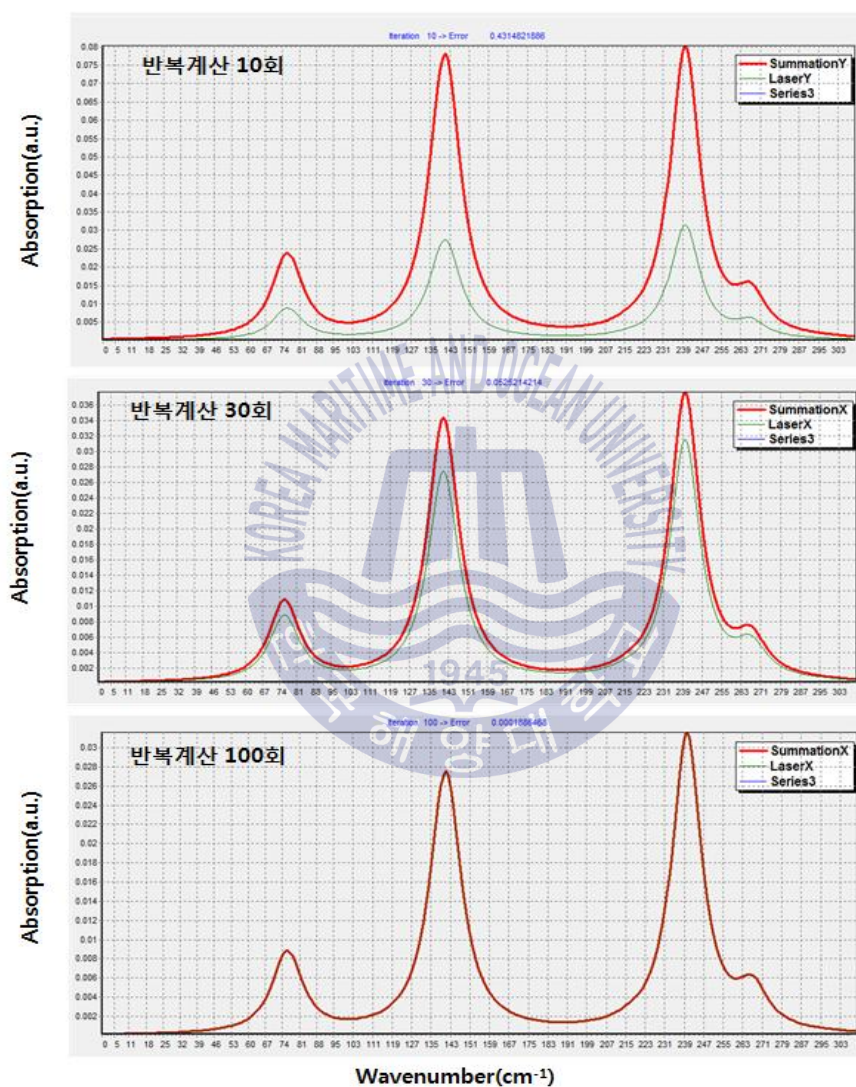
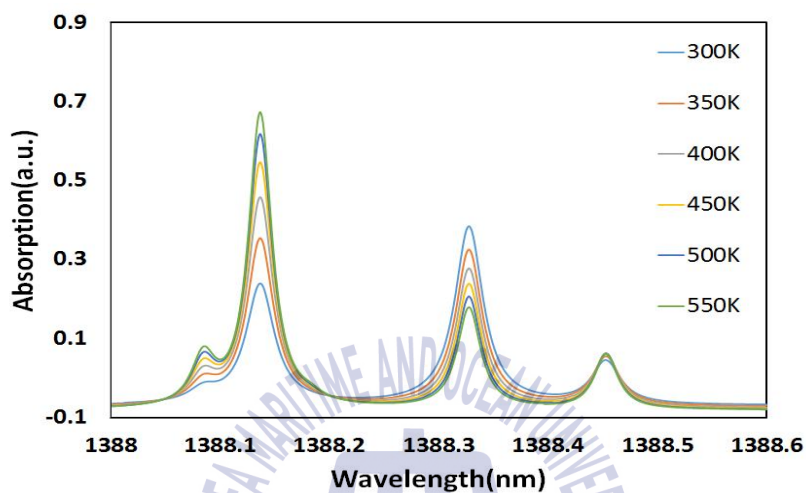
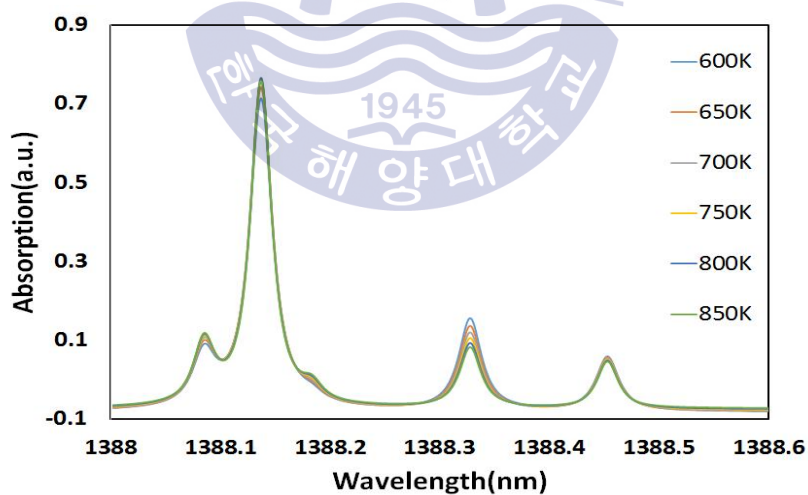


Fig. 4.11 Calculation process of the template matching method



(a) Pattern changes at region of low temperature



(b) Pattern changes at region of high temperature

Fig. 4.12 Configuration of pattern change

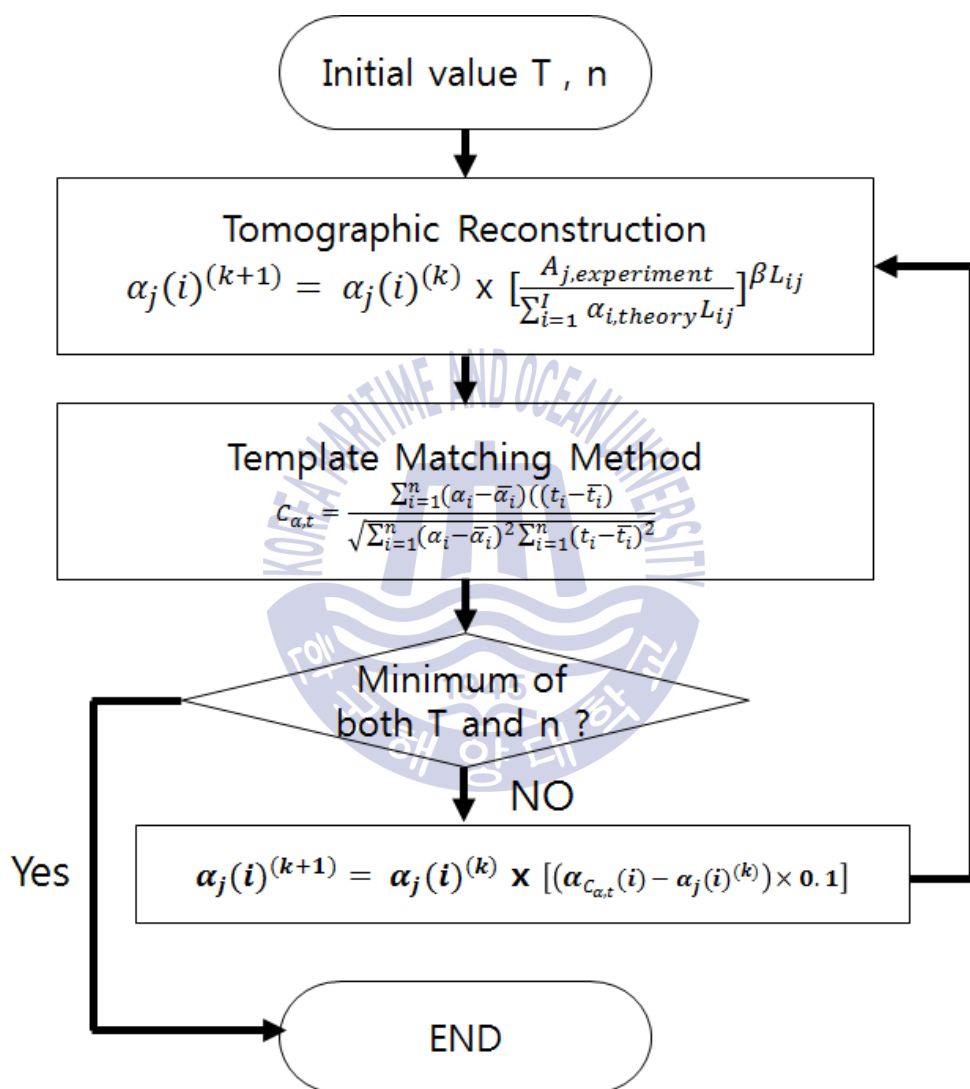


Fig. 4.13 Flow chart of pattern matching algorithm



#### 4.2.2 가상의 2D 온도분포 만들기

알고리즘의 성능평가를 하기 위해서 식 (4.1)을 이용하여 우선 가상의 온도분포를 가우시안 분포 형태로 만들었다. 가로와 세로  $11 \times 11$  격자로 구성되었으며, 단위격자의 길이는 4mm이다.

Fig. 4.14은 가우시안 분포로 만들어진 가상의 2차원 온도장을 보여준다. 중앙부의 최고온도는 600K이며, 경계면의 온도는 300K이다. 가우시안 온도장 계산에 사용된 파라미터의 정보는 Table 4.2에서 보여주고 있다.

Table 4.3은 HITRAN2008 database<sup>[13]</sup>에서 제공된 H<sub>2</sub>O의 파장 및 흡수강도의 값으로 본 연구에서는 파장이 1388.0~1388.6nm에서 총 40개의 흡수스펙트럼 파장 값을 사용하였다.

Fig. 4.15와 Fig. 4.16은 가상 온도장으로부터 식 (2.8)과 식 (4.3)을 이용하여 만들어진 가상의 흡수스펙트럼 그래프를 보여주고 있다. 선평확장계수는 앞에서 실험으로 얻어진 값과 동일 값을 사용하였고, Voigt profile을 적용하여 흡수스펙트럼을 만들었다.



Table 4.2 Information of parameters used for Gaussian function

| Fig. 4.14 | $X_0$ (mm) | $Y_0$ (mm) | Deviation of temperature ( $D$ ) | Sigma ( $\sigma$ ) |
|-----------|------------|------------|----------------------------------|--------------------|
| Vortex 1  | 0          | 0          | 300                              | 8.0                |

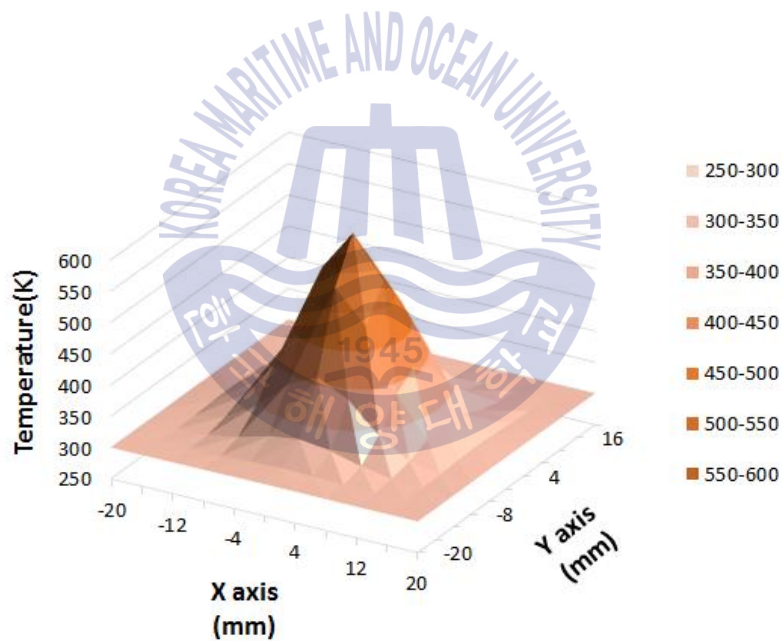
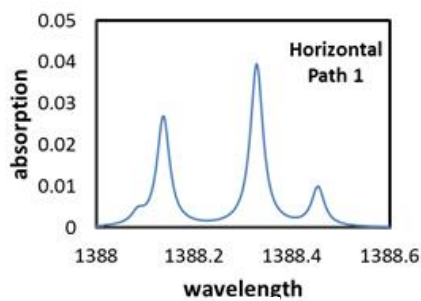


Fig. 4.14 Phantom for 2D temperature distribution

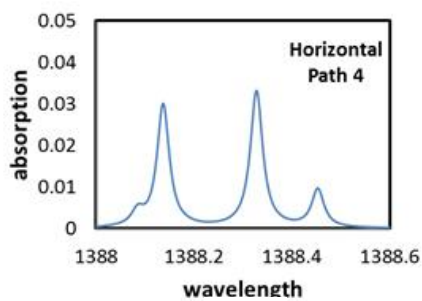
**Table 4.3** Information of spectrum lines of H<sub>2</sub>O at  
reference temperature

| Wavenumber          | Wavelength | Linestrength                            | E''                 |
|---------------------|------------|-----------------------------------------|---------------------|
| [cm <sup>-1</sup> ] | [nm]       | [cm <sup>-1</sup> · atm <sup>-1</sup> ] | [cm <sup>-1</sup> ] |
| 7202.037            | 1388.496   | 9.18x10 <sup>-10</sup>                  | 3224.546            |
| 7202.060            | 1388.492   | 2.74x10 <sup>-10</sup>                  | 2495.166            |
| 7202.087            | 1388.486   | 3.56x10 <sup>-4</sup>                   | 136.1639            |
| 7202.256            | 1388.454   | 2.74x10 <sup>-2</sup>                   | 446.5107            |
| 7202.327            | 1388.440   | 3.76x10 <sup>-5</sup>                   | 488.1077            |
| 7202.448            | 1388.417   | 4.08x10 <sup>-10</sup>                  | 3135.764            |
| 7202.494            | 1388.408   | 9.78x10 <sup>-10</sup>                  | 2670.79             |
| 7202.583            | 1388.391   | 3.04x10 <sup>-6</sup>                   | 1201.921            |
| 7202.700            | 1388.368   | 1.64x10 <sup>-7</sup>                   | 1411.642            |
| 7202.722            | 1388.364   | 5.75x10 <sup>-8</sup>                   | 1817.451            |
| 7202.805            | 1388.348   | 1.07x10 <sup>-9</sup>                   | 3870.224            |
| 7202.909            | 1388.328   | 1.15x10 <sup>-1</sup>                   | 70.0908             |
| 7202.911            | 1388.328   | 5.27x10 <sup>-10</sup>                  | 3216.193            |
| 7202.999            | 1388.311   | 1.68x10 <sup>-6</sup>                   | 1819.335            |
| 7203.037            | 1388.303   | 2.25x10 <sup>-9</sup>                   | 2586.529            |
| 7203.239            | 1388.264   | 8.58x10 <sup>-8</sup>                   | 2630.192            |
| 7203.265            | 1388.259   | 3.78x10 <sup>-8</sup>                   | 2053.969            |
| 7203.376            | 1388.238   | 1.74x10 <sup>-9</sup>                   | 3736.171            |
| 7203.450            | 1388.224   | 5.40x10 <sup>-8</sup>                   | 2552.857            |
| 7203.479            | 1388.218   | 5.30x10 <sup>-10</sup>                  | 2490.354            |
| 7203.635            | 1388.188   | 3.26x10 <sup>-8</sup>                   | 446.6966            |
| 7203.658            | 1388.184   | 1.58x10 <sup>-4</sup>                   | 1742.306            |
| 7203.763            | 1388.163   | 1.18x10 <sup>-7</sup>                   | 1131.776            |
| 7203.784            | 1388.159   | 8.38x10 <sup>-6</sup>                   | 2000.863            |

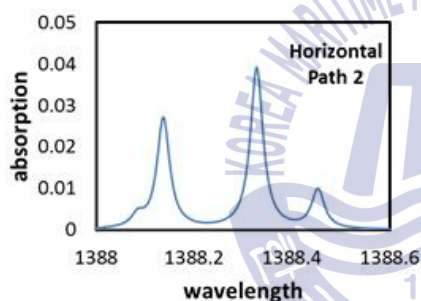
|          |          |                        |          |
|----------|----------|------------------------|----------|
| 7203.822 | 1388.152 | $3.48 \times 10^{-5}$  | 446.5107 |
| 7203.824 | 1388.152 | $3.91 \times 10^{-10}$ | 4016.115 |
| 7203.890 | 1388.139 | $5.65 \times 10^{-2}$  | 742.0762 |
| 7203.894 | 1388.138 | $1.88 \times 10^{-2}$  | 742.073  |
| 7203.935 | 1388.130 | $4.53 \times 10^{-4}$  | 285.4186 |
| 7203.950 | 1388.127 | $1.77 \times 10^{-6}$  | 1050.158 |
| 7203.968 | 1388.124 | $9.65 \times 10^{-7}$  | 2042.31  |
| 7204.030 | 1388.112 | $1.20 \times 10^{-4}$  | 1640.506 |
| 7204.053 | 1388.107 | $1.65 \times 10^{-9}$  | 3299.991 |
| 7204.069 | 1388.104 | $4.83 \times 10^{-9}$  | 1474.98  |
| 7204.135 | 1388.092 | $1.70 \times 10^{-5}$  | 1772.414 |
| 7204.166 | 1388.086 | $7.89 \times 10^{-3}$  | 931.237  |
| 7204.232 | 1388.073 | $2.86 \times 10^{-9}$  | 3058.398 |
| 7204.353 | 1388.050 | $4.63 \times 10^{-7}$  | 2439.954 |
| 7204.426 | 1388.036 | $1.21 \times 10^{-8}$  | 2248.063 |
| 7204.546 | 1388.013 | $3.36 \times 10^{-8}$  | 1525.135 |



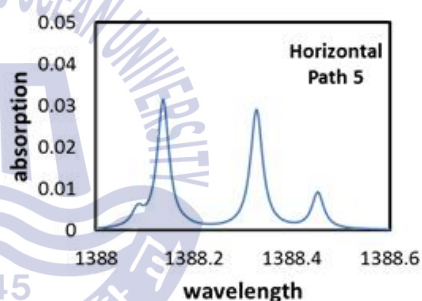
(a)



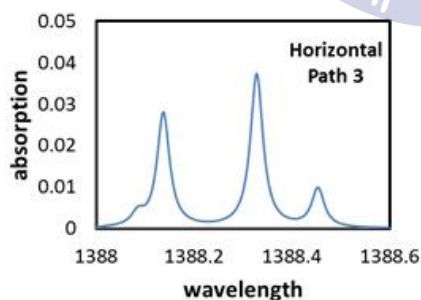
(b)



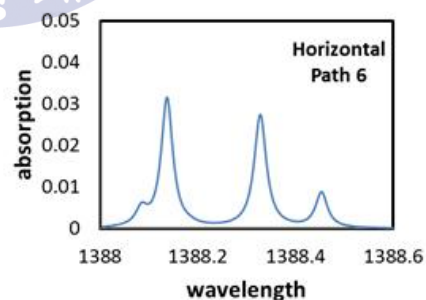
(c)



(d)



(e)



(f)

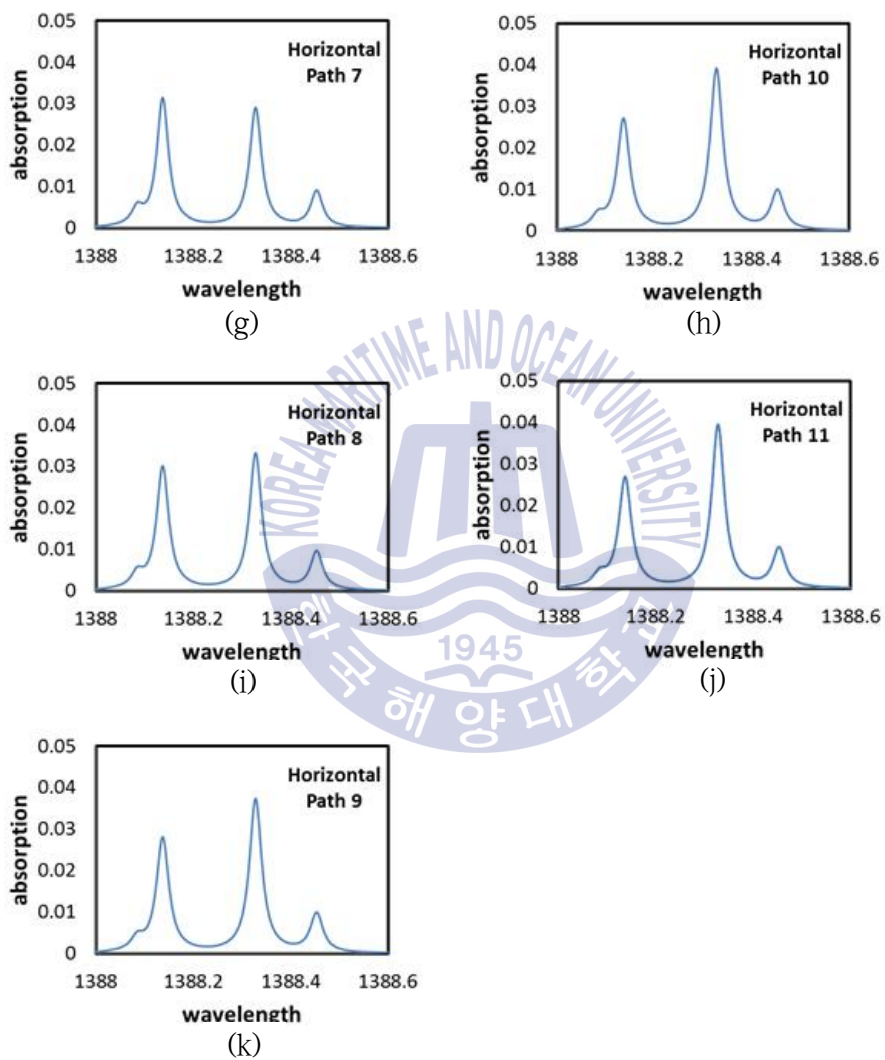
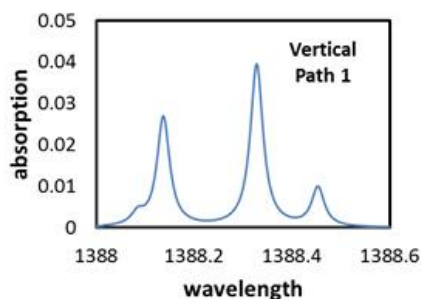
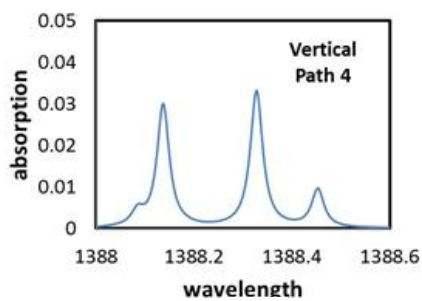


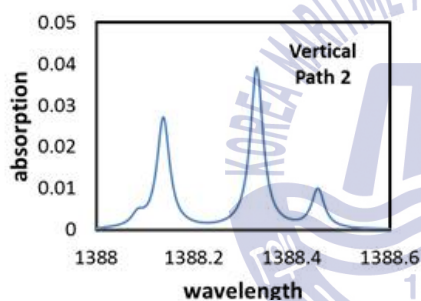
Fig. 4.15 Phantom absorption graphs of horizontal lasers



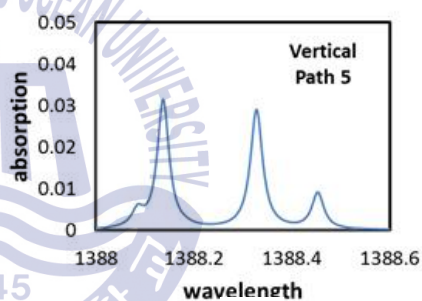
(a)



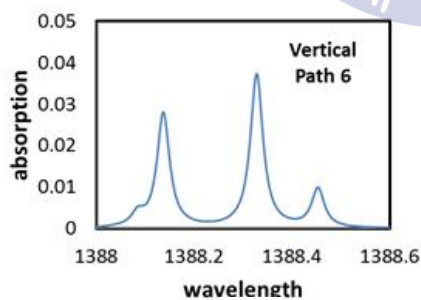
(b)



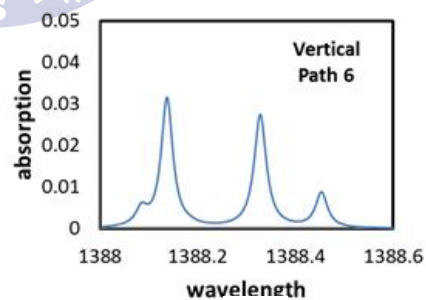
(c)



(d)



(e)



(f)

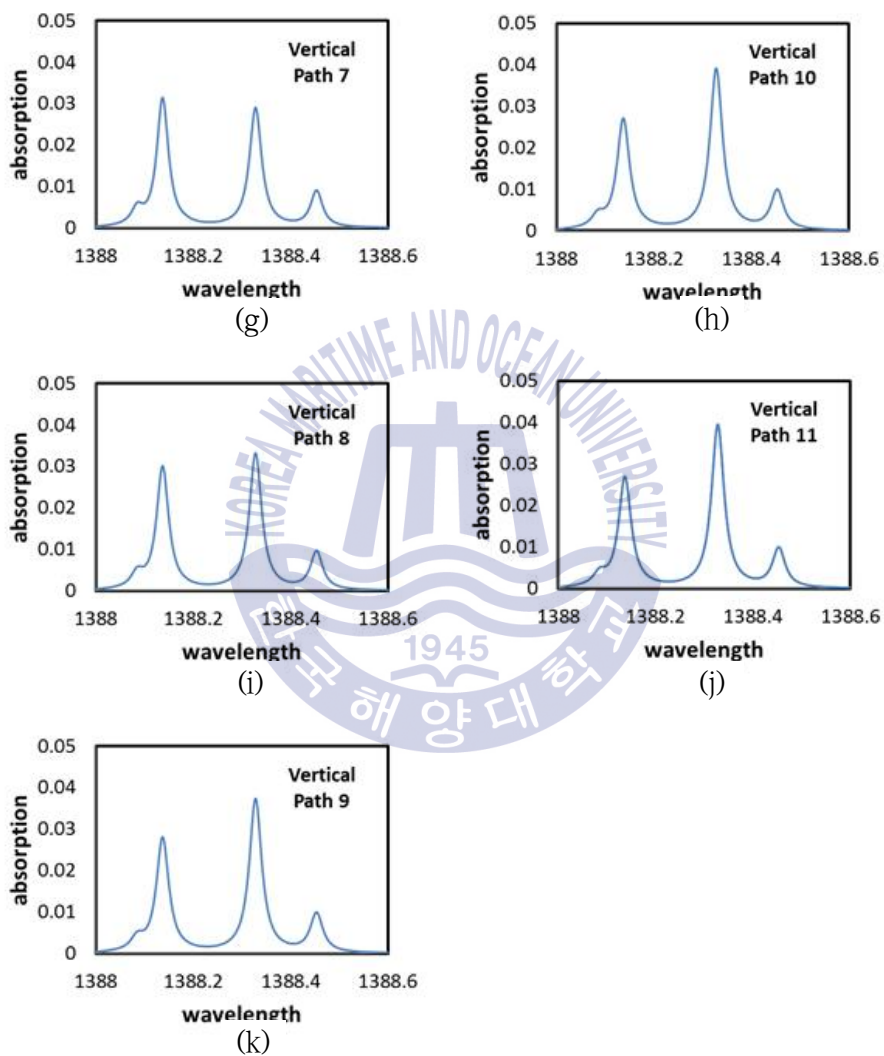


Fig. 4.16 Phantom absorption graphs of vertical lasers

#### 4.2.3 가상데이터의 재구성 온도분포 결과

Fig. 4.17는 개발된 알고리즘을 이용하여 재구성 계산된 온도 분포를 보여주고 있다. 보다 다양한 온도에서 계산을 활용하기 위하여 경계면의 온도를 300K으로 고정시키지 않고 계산을 하였다. 중심부에서의 재구성 계산된 온도는 가상온도 600K에 못 미치는 450K을 보였으며, 경계면의 가상온도 300K에서는 275K의 온도를 나타내었다. 절대 온도편차 범위와 상대오차는 25K ~ 150K과 0.078을 나타내었다. 상대오차가 다소 높은 결과가 나왔으나, Full-Profile 상호상관계산 알고리즘을 이용한 재구성 계산은 최대값의 비를 이용하는 방법보다 더 안정적인 계산이 수행되었다. 이는 모든 파장의 영역에서 커브피팅을 하여 신호 값의 에러와 불일치, 바이어스 에러 값에 의한 영향을 최소화시켰기 때문으로 사료된다. 하지만, 온도가 높은 영역에서 주변의 필요 없는 흡수 정보를 다수 참조하여 계산함으로써 오차가 크게 나타나게 되었다. 이 장에서는 고온부의 오차가 크게 나타남으로 실험적 검증은 생략하고, 다음 장에서 이를 보완한 새로운 알고리즘에 대해 설명하도록 한다.



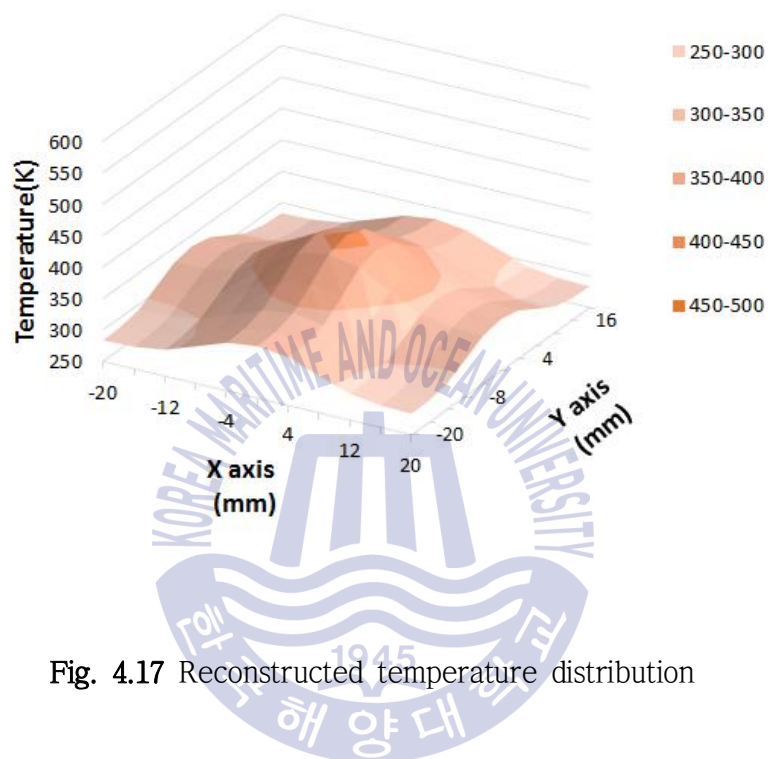


Fig. 4.17 Reconstructed temperature distribution

### 4.3 6점 최적화 알고리즘

Full-Profile 상호상관계산 알고리즘은 불필요한 파장의 흡수값을 이용하는 문제로 인해 고온부에서 재구성 오차가 발생하는 결과를 가져왔었다. 따라서 이번 장에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 흡수강도가 큰 대표적인 6 파장을 선정하여 불필요한 파장을 제거하였고, 최적화 커브피팅 알고리즘을 개발하여 온도와 농도를 동시에 재건할 수 있도록 하였다.

#### 4.3.1 6점 최적화 알고리즘의 개념

Table 4.4는 기준온도에서 HITRAN2008 database<sup>[13]</sup>로부터 선정된 6 파장의 정보를 보여주고 있으며, 선정된 6 파장에서 온도 변화에 따른 흡수강도 값의 변화가 큼을 Fig. 4.18로부터 알 수 있다.

Fig. 4.19는 개발된 6점 최적화 알고리즘의 흐름도를 보여주고 있다. 그림의 순서도에 의해서 오차가 최소가 될 때까지 반복계산을 통해 온도와 농도분포를 동시에 구할 수 있게 하였다.

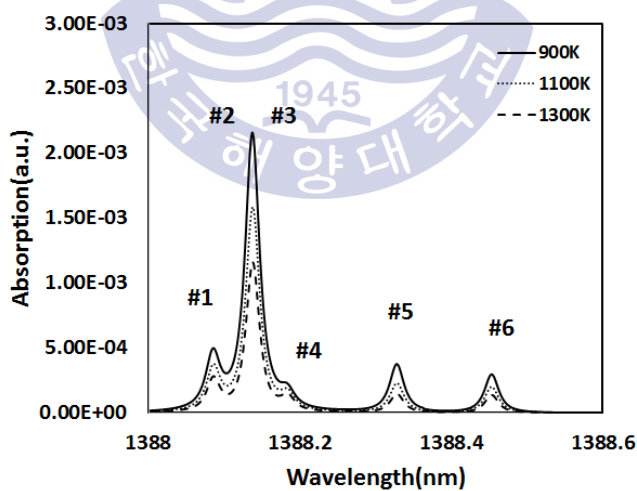
초기온도와 농도의 산정은 가로, 세로 레이저의 정보를 이용한 MLOS 기법을 사용하였다. 재구성 계산 방법으로는 MART법을 사용하였고, 선정된 6개의 파장에서 흡수계수의 반복계산은 오차가 수렴이 될 때까지 각각 수행된다. 계산된 모든 셀들의 흡수량을 이용하여 온도와 농도 (수 밀도)를 산정하기 위해서 HITRAN2008 database<sup>[13]</sup>로부터 농도 1.0을 기준으로 한

270K ~ 1500K까지의 흡수스펙트럼 분포 테이블을 이용하였다. 이 테이블 값들은 최적화 커브피팅을 위해 중요한 참고 자료가 된다. 각각의 셀들은 농도( $n_{i,j}$ )와 흡수계수( $\alpha_{i,j}$ )의 값을 가지고 있는 흡수스펙트럼 그래프의 형태로 나타낼 수 있다. 이 그래프와 만들어진 테이블과 가장 일치하는 그래프를 찾기 위해 다음의 피팅기법을 이용한다. 최적화 커브피팅은 농도에 관여하는 스케일 피팅 (Scale fitting)과 온도에 관여하는 최소자승법에 의한 커브피팅이 동시에 사용된다. 참고 흡수스펙트럼 분포 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 함으로써 셀의 흡수그래프와 가장 일치하는 스펙트럼 그래프 형상을 찾을 수가 있다. 최종적으로 최적화된 그래프의 테이블 정보로부터 새로운 온도를 구할 수 있으며, 스케일 피팅으로부터 농도를 구하게 된다.

최적화 방법을 이용하여 재구성 온도와 농도를 결정하기 위해서 오차 최소화 판별 기준을 정해야하는데 이를 결정하기 위해 식 (4.4)를 이용하였다. 오차값은  $10^{-20}$ 보다 작으면서 그 값이 변하지 않을 때까지 반복 계산된다. 수렴 조건을 만족하지 않을 경우에는 오차에서 가변형의 수렴가중치  $\beta$ 를 사용하여 흡수계수 값을 수정하였고, 수렴될 때까지 다시 반복계산을 실시한다. 가변형의 수렴가중치는 0.5로부터 시작해서 계산을 반복할수록 수렴가중치의 값을 반으로 줄어들게 하여 오차계산의 정밀도를 더욱 높게 하였다.

**Table 4.4** Information of 6 spectrum lines of H<sub>2</sub>O at  
reference temperature

| Wavenumber<br>[cm <sup>-1</sup> ] | Wavelength<br>[nm] | Linestrength<br>[cm <sup>-1</sup> · atm <sup>-1</sup> ] | E''<br>[cm <sup>-1</sup> ] |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------|
| 7202.255                          | 1388.453           | $2.73 \times 10^{-2}$                                   | 446.51                     |
| 7202.909                          | 1388.326           | $1.15 \times 10^{-1}$                                   | 70.09                      |
| 7203.658                          | 1388.183           | $1.59 \times 10^{-4}$                                   | 1742.30                    |
| 7203.903                          | 1388.136           | $1.88 \times 10^{-2}$                                   | 742.08                     |
| 7203.906                          | 1388.135           | $5.65 \times 10^{-2}$                                   | 742.07                     |
| 7204.166                          | 1388.085           | $7.88 \times 10^{-3}$                                   | 931.24                     |



**Fig. 4.18** The selected 6-line profiles

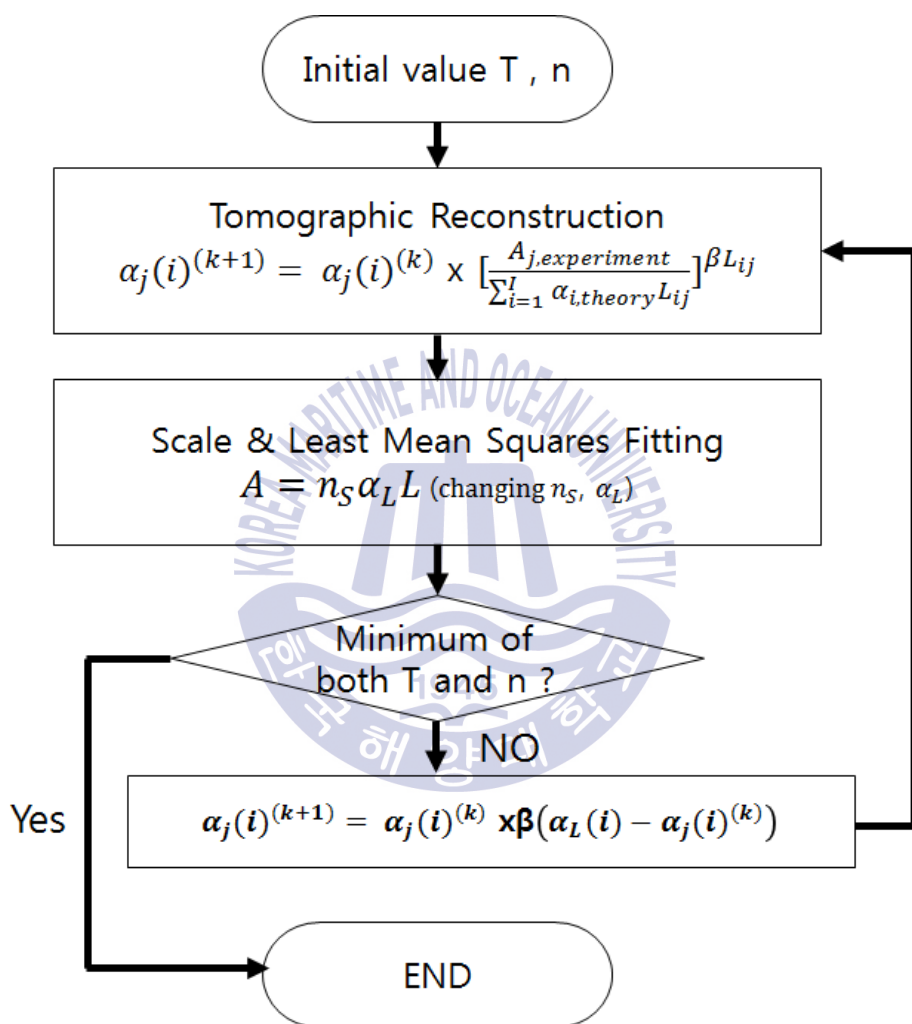


Fig. 4.19 Flow chart of 6-line profiles algorithm

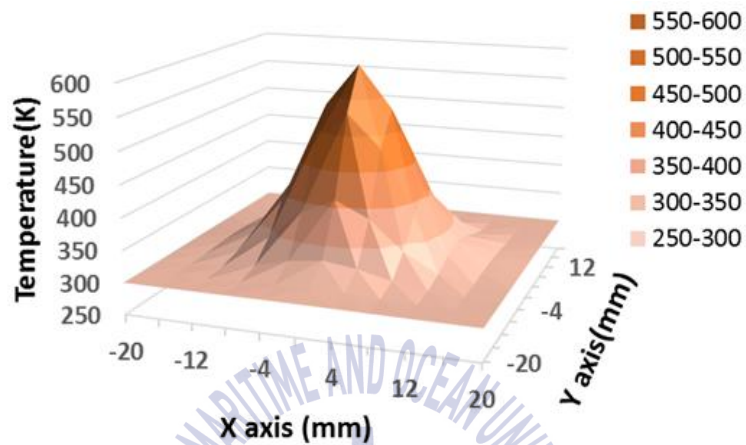
### 4.3.2 가상의 2D 온도분포 만들기

6점 최적화 알고리즘의 성능평가를 하기 위해 가로와 세로  $11 \times 11$ 의 셀로 구성된 온도장과 농도장을 만들었다. 실제 연소의 온도장 및 농도장과 유사하게 만들기 위해 가우시안 분포의 함수를 이용하였다. Table 4.5는 식 (4.1)을 이용하여 만든 가우시안 함수의 파라미터 값들을 나타내고 있다.

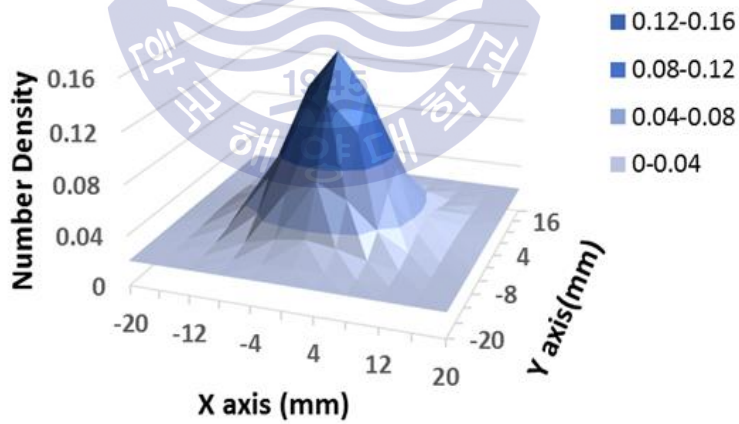
Fig. 4.20은 저온부에서의 가우시안 분포로 만들어진 가상의 온도장과  $H_2O$  농도장이다. 최소온도와 농도는 300K, 0.02이고, 최고온도와 농도는 600K, 0.16이다. Fig. 4.21은 고온부에서의 가상의 온도장과  $H_2O$  농도장을 나타내며, 최소온도와 농도는 300K, 0.02이고, 최고온도와 농도는 1000K, 0.24이다.

Table 4.5 Information of parameters used for Gaussian function

| Fig 4.20       | $X_0$ (mm) | $Y_0$ (mm) | Deviation ( $D$ ) | Sigma ( $\sigma$ ) |
|----------------|------------|------------|-------------------|--------------------|
| Temperature    | 0          | 0          | 300               | 8.0                |
| Number density | 0          | 0          | 0.14              | 8.0                |
| Fig 4.21       | $X_0$ (mm) | $Y_0$ (mm) | Deviation ( $D$ ) | Sigma ( $\sigma$ ) |
| Temperature    | 0          | 0          | 700               | 8.0                |
| Number density | 0          | 0          | 0.22              | 8.0                |

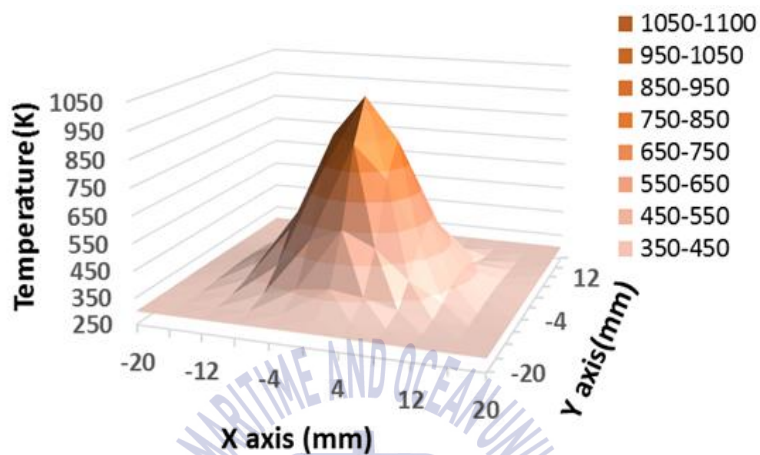


(a) 2D temperature distributions

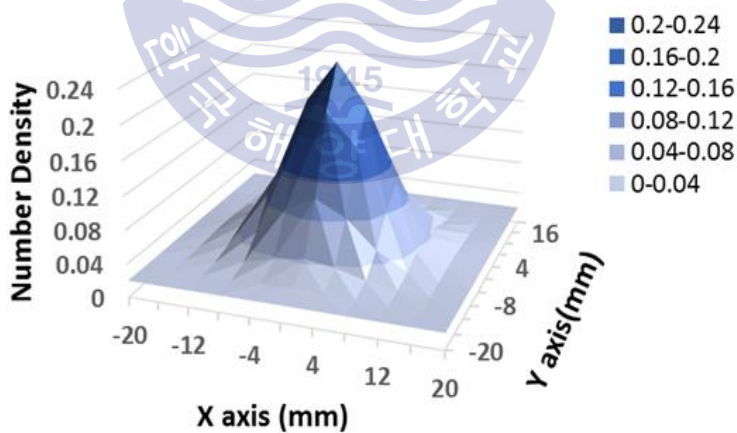


(b) 2D H<sub>2</sub>O number density distributions

Fig. 4.20 Phantoms distributions at low temperature region



(a) 2D temperature distributions



(b) 2D H<sub>2</sub>O number density distributions

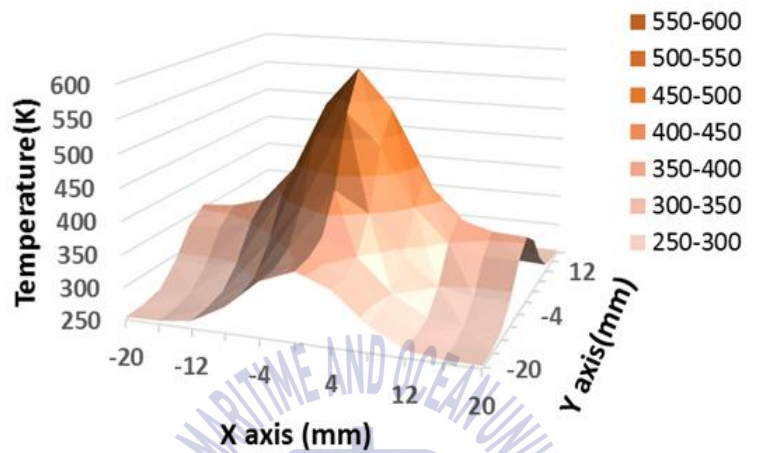
Fig. 4.21 Phantoms distributions at high temperature region



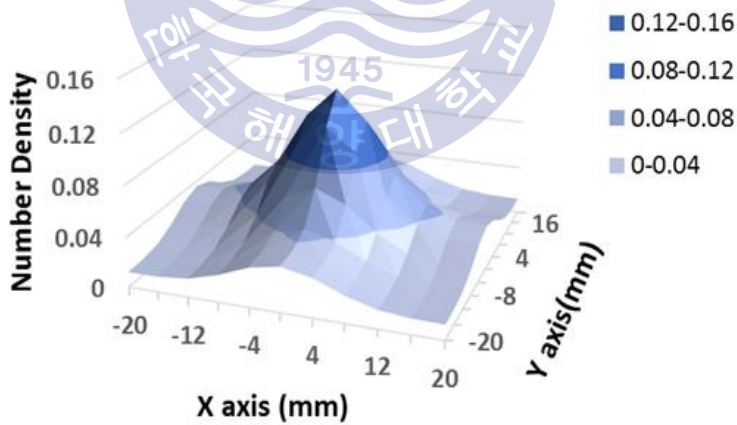
### 4.3.3 가상데이터의 재구성 온도분포 결과

Fig. 4.22에서는 저온부에서 6점 최적화 알고리즘을 이용하여 계산된 재구성 온도, H<sub>2</sub>O 농도분포의 결과를 보여준다. Fig. 4.20의 저온부에서의 가상데이터와의 절대 온도편차 범위와 상대오차는 -54K ~ 45K와 0.06을 나타냈다. 최고온도인 중심부의 온도차이는 4K으로 가장 근접한 결과를 보였고, 반면에 경계부에서 가장 큰 오차를 나타내었다. 농도의 절대편차와 상대오차는 -0.015 ~ 0.029 범위와 0.04였고, 중심부에서의 농도편차는 0.029 차이로 가장 컸으며, 경계부에서 농도 편차가 가장 작은 결과를 보였다.

Fig. 4.23은 고온부에서 개발된 알고리즘을 이용하여 계산된 재구성 온도, H<sub>2</sub>O 농도분포의 결과이다. Fig. 4.21의 고온부에서의 가상데이터와의 절대온도 편차는 -69K ~ 52K 범위를 나타내었고, 상대오차는 0.048을 나타내었다. 이는 J. Song et al<sup>[16]</sup>의 121셀 (11×11)에서 상대오차 값 0.088과 비교해볼 때, 약 2배 더 좋은 성능의 결과를 나타내었다. 또한 앞의 경우와 마찬가지로 중심부에서 5K 온도 차이로 가장 유사한 결과를 보였으며, 반면에 경계부에서 가장 큰 오차를 보였다. 농도의 절대편차는 -0.014 ~ 0.018 범위였고, 상대오차는 0.0327을 나타내었다. 중심부에서 농도편차가 0.018 차이로 가장 컸으며, 경계부에서 농도편차가 가장 작은 결과를 보였다. 가상의 온도장과 농도장에서 개발된 알고리즘으로 재구성된 온도, 농도장의 결과는 상호상관 알고리즘을 이용한 결과보다 안정적인 계산을 보였으며, 저온부와 고온부 모두에서 우수한 재구성 성능을 보였다.

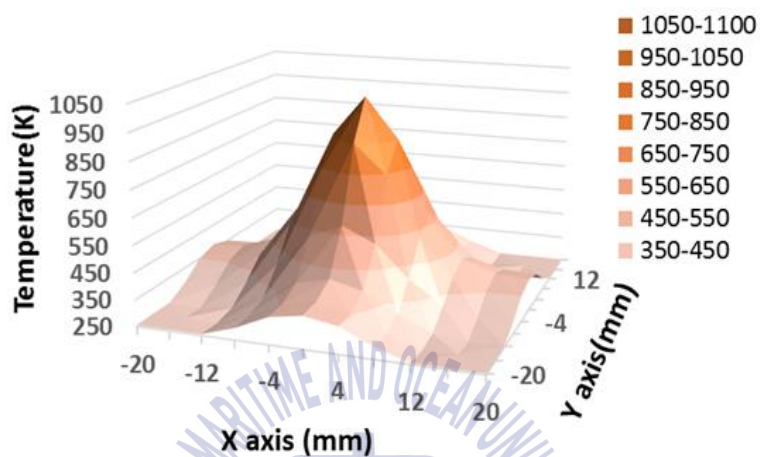


(a) 2D temperature distributions

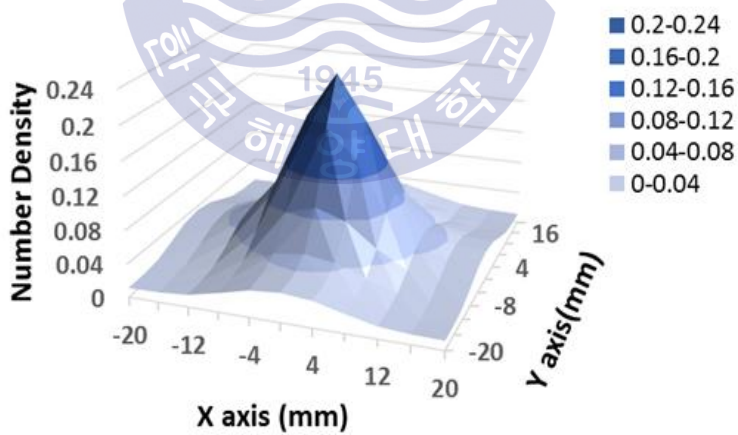


(b) 2D H<sub>2</sub>O number density distributions

Fig. 4.22 Reconstructed distributions at low temperature region



(a) 2D temperature distributions



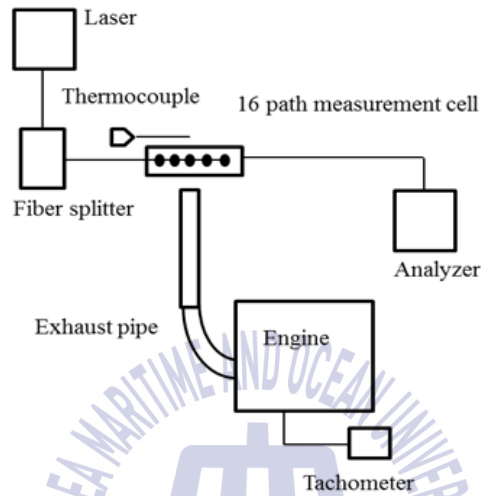
(b) 2D H<sub>2</sub>O number density distributions

Fig. 4.23 Reconstructed distributions at high temperature region

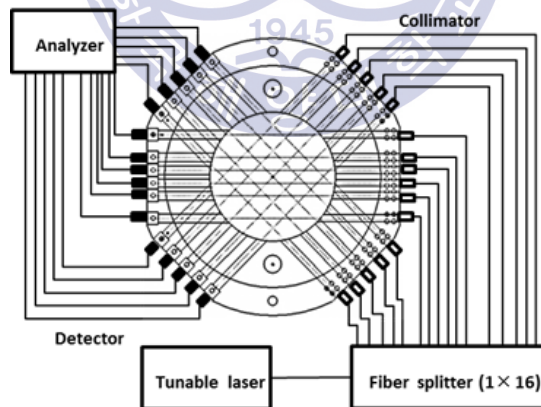
#### 4.3.4 엔진 실험 장치

Fig. 4.24 (a), (b)는 16개의 레이저 빔을 이용하여 엔진 배기가스의 온도를 측정한 실험 장치도와 사용된 16path 레이저가 지나가는 셀을 나타낸다.

Fig. 4.25는 엔진 실험장치의 실제 장치도를 보여주고 있다. 엔진 배기가스에서  $\text{H}_2\text{O}$ 의 1388nm 흡수스펙트럼을 측정하기 위해서 주사범위 0.6nm의 DFB 반도체 레이저를 사용하였고, 레이저의 스캔 주파수는 1kHz로 설정하였다. 레이저광은 빔 스플리터에 의해서 16 path의 빔으로 분리되어지고, 분리된 레이저 신호는 포토다이오드에서 검출된다. 검출된 신호는 데이터레코더에서 500kHz 즉, 1스캔당 500개의 데이터로 저장된다. 레이저가 지나가는 측정영역인 셀의 직경은 70mm이고, FUJI HEAVY INDUSTRIES사의 OHC (Over Head Camshaft) 가솔린 엔진을 사용하여 공회전 모드로 구동시켰다. 배기가스 배출구 (Exhaust pipe)의 직경은 22mm, 길이는 160mm으로 구성하였으며, 레이저실험과 동시에 직경 100  $\mu\text{m}$ 의 서모커플을 사용해서 측정영역의 중심부에서 온도측정을, 회전속도계 (Tachometer)를 사용하여 엔진스피드를 실시간으로 측정하였다.

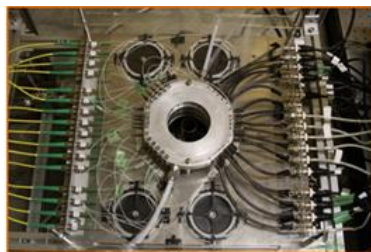


(a) Experimental apparatus

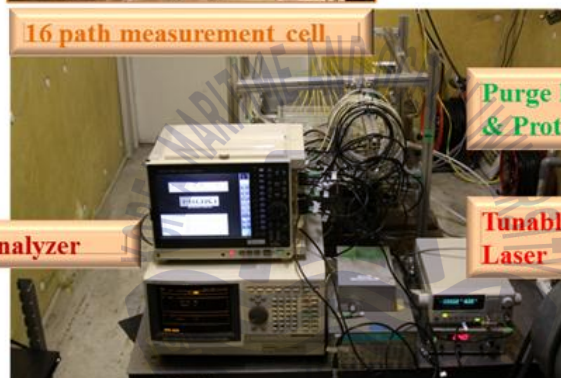


(b) 16 path measurement cell measurement system

Fig. 4.24 The outline of an experimental apparatus and measurement cell



16 path measurement cell



Analyzer

Purge line  
& Protect flow line

Tunable  
Laser



Fig. 4.25 Picture of engine experiment system

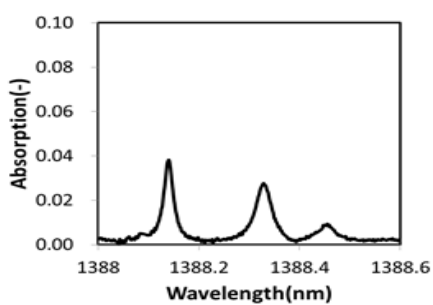


#### 4.3.5 실험 결과 및 재구성 온도분포 결과

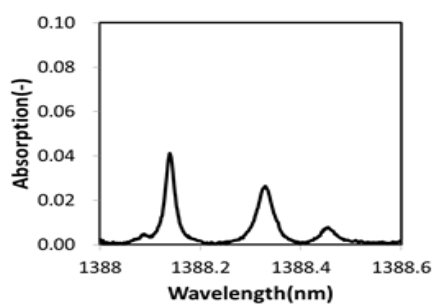
Fig. 4.26은 엔진구동 9초에서 레이저실험으로 만들어진 1388nm 영역의  $H_2O$  흡수스펙트럼 그래프를 보여주고 있다. 본 연구의 알고리즘은 가로, 세로 레이저를 사용하여 재구성 계산을 하므로 대각선의 6개의 그래프는 제외시켰다.

Fig. 4.27은 엔진 구동 후 10초 간 서모커플로 측정된 셀 중심부에서의 온도변화와 엔진스피드의 기록이다. 엔진스피드가 상승하면 온도도 함께 상승하면 알 수 있다. 8 ~ 10초 사이의 서모커플을 이용하여 측정된 온도는 약 500K 정도에서 유지되었고, 그 때 엔진스피드는 약 2900rpm이었다. 엔진 배기가스의 온도데이터는 알고리즘의 재구성 온도결과의 성능평가를 위해 비교된다.

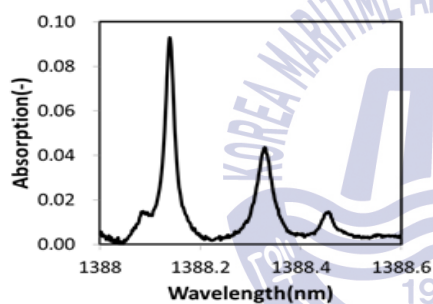
Fig. 4.28에서는 개발된 6점 최적화 알고리즘을 사용하여 재구성 계산된 온도, 농도분포의 결과를 보여준다. Fig. 4.26의 엔진 구동 9초에서 측정된 흡수스펙트럼 데이터를 사용하였으며, 거리역수 보간법<sup>[16]</sup>을 사용하여 12개의 가상레이저를 추가시켜 공간분해능을 높였다. Fig. 4.28(a)는 재구성 계산된 온도장이며, 경계면에서는 353K이었고, 중심부에서의 최고온도는 501.6K으로 Fig. 4.27의 서모커플 측정 온도와 상당히 잘 맞는 결과를 보였다. Fig. 4.28(b)는 재구성 계산된  $H_2O$  농도장의 결과이다. 중심부의 농도는 0.0358, 경계면에서 최저 농도는 0.0111이었다.



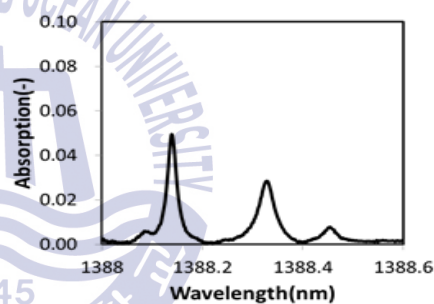
(a) Laser path 1



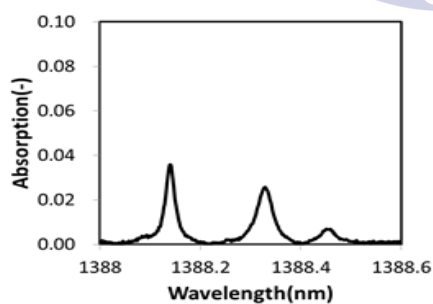
(b) Laser path 2



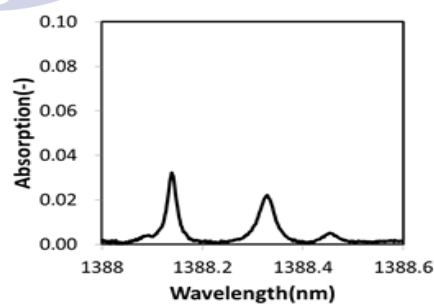
(c) Laser path 3



(d) Laser path 4

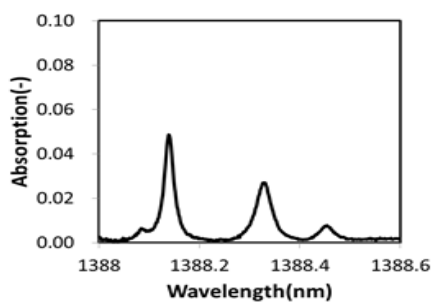


(e) Laser path 5

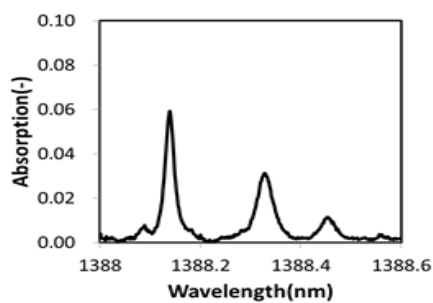


(f) Laser path 6

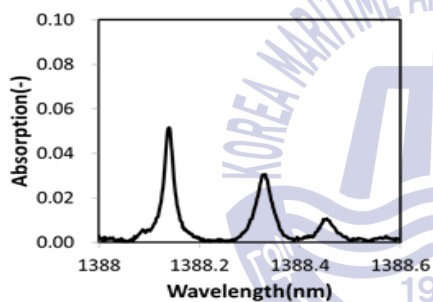




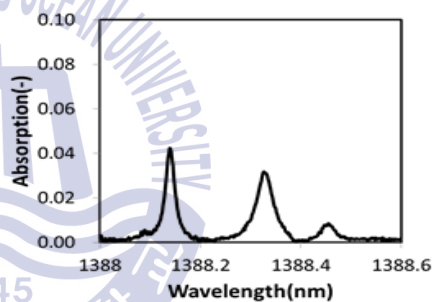
(g) Laser path 7



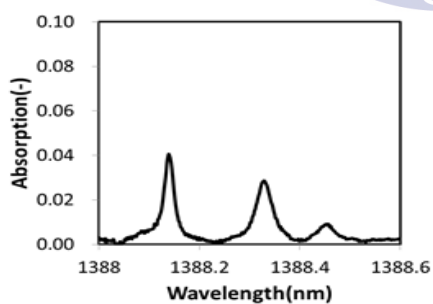
(h) Laser path 8



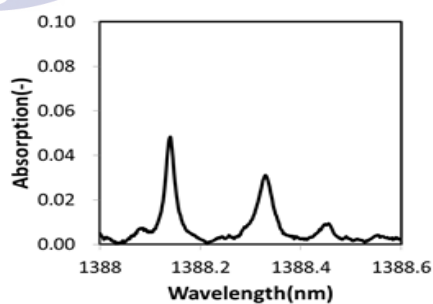
(i) Laser path 9



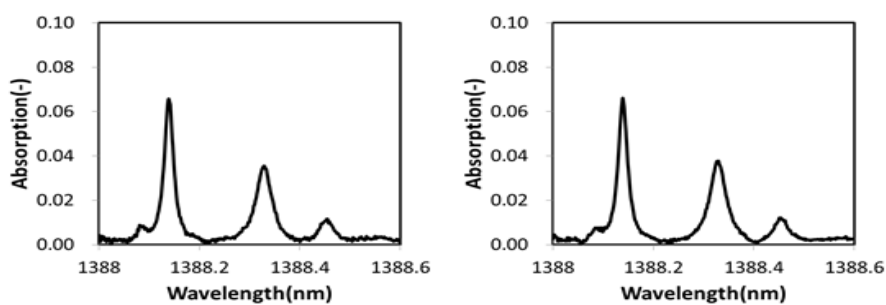
(j) Laser path 10



(k) Laser path 11

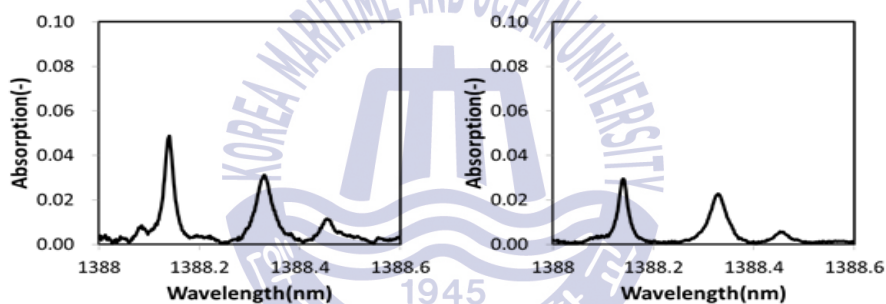


(l) Laser path 12



(m) Laser path 13

(n) Laser path 14



(o) Laser path 15

(p) Laser path 16

Fig. 4.26 Absorption graphs of  $H_2O$  spectrum with 16 beams

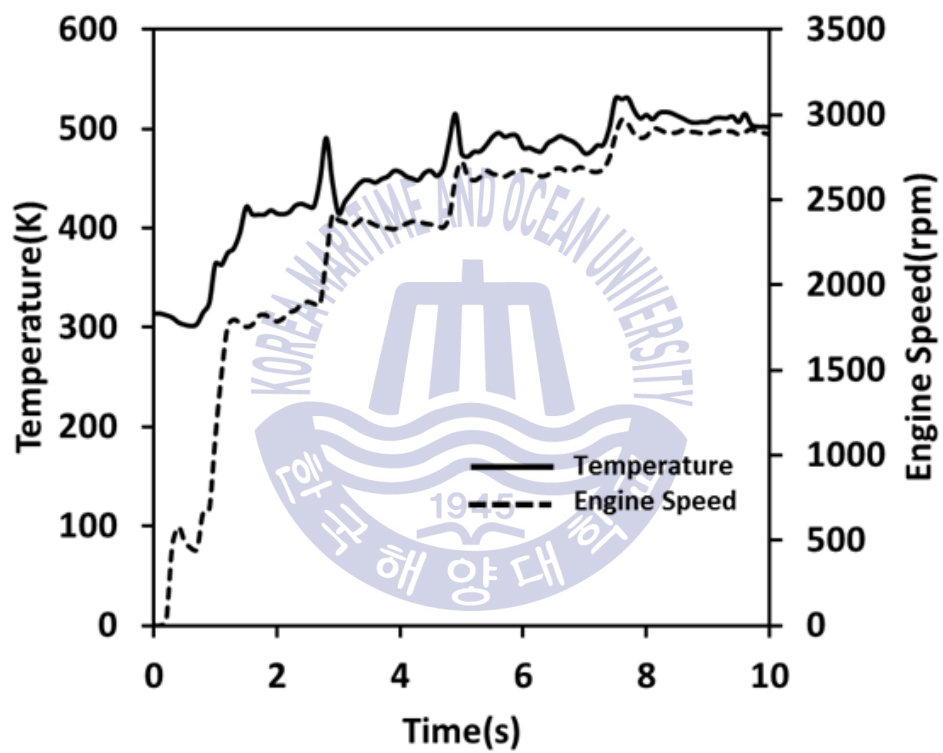
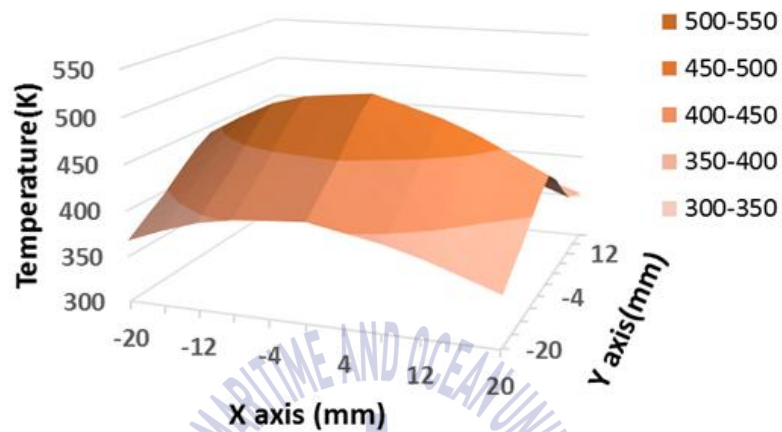
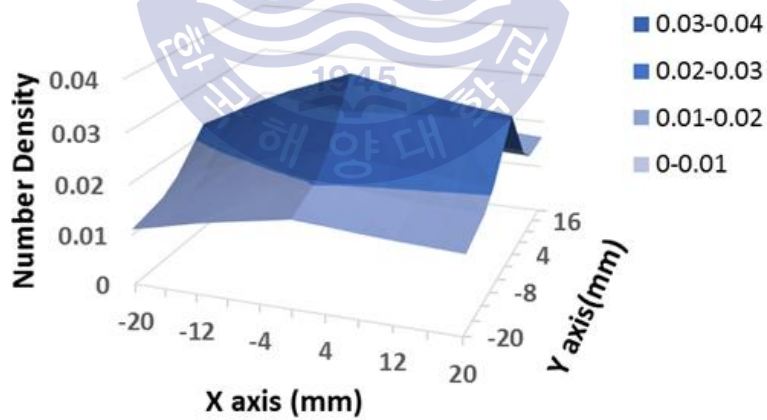


Fig. 4.27 Temperature history measured by thermocouple at the center  
(X=0mm, Y=0mm)



(a) Reconstructed 2D temperature distribution



(b) Reconstructed 2D H<sub>2</sub>O number density

Fig. 4.28 Reconstructed results in engine exhausts

## 제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 CT-TDLAS를 이용하여 1388.0~1388.6nm 영역에서 H<sub>2</sub>O 흡수스펙트럼을 이용한 온도장과 농도장의 재구성 계산을 실시하였다. 재구성 재건 계산 방법으로 MART법을 채택하였으며, 온도장과 농도장의 초기 값의 설정은 MLOS 방법을 이용하였을 때 가장 좋은 재건계산 결과를 나타내었다.

재구성 온도 계산을 위해 3가지의 알고리즘을 개발하여 이론 및 실험적으로 검증을 실시하였다. 개발된 알고리즘으로 세 파장 계수비교를 이용한 Fitting 방법은 두 파장 이용 방식보다 더 우수한 온도장의 재건 계산 성능을 보였고, 흡수량 최대값의 비의 정보를 더 많이 이용하면, 더 좋은 재구성 계산 성능을 발휘함을 알 수 있었다. 하지만, 세 파장의 피크값만을 커브피팅에 이용하기 때문에 노이즈가 포함된 측정신호로부터 정확한 최대값을 찾기가 어려움의 한계가 있었다.

Full-Profile 상호상관계산 알고리즘을 이용한 방법은 신호 값의 노이즈와 불일치, 바이어스 에러로 인한 불안정성을 제거할 수 있는 커브피팅을 할 수 있었지만, 불필요한 파장까지 참조함으로 인해 재구성 계산의 한계를 보였다. 이 방법을 통해 재건 계산의 가장 이상적인 모델은 흡수강도가 높은 파장들의 정보를 선별해야 더 좋은 커브피팅이 가능함을 알 수 있었다.

선행 연구를 통해 최종적으로 개선된 6점 최적화 알고리즘은 2D 온도장과 농도장의 동시 재건 계산이 가능하였다. 가상으로 만들어진 저온, 고온부 온도장에서 기존 연구의 계산 알고리즘보다 상대오차가 약 2배 더 좋은 재구성 성능을 보였다. 이를 활용하여 실제 엔진 배기가스의 온도, 농도 분석에 적용하였으며, 서모커플로 측정된 온도와의 비교를 통해 좋은 재구성 성능을 보임을 증명하였다.

본 연구를 통해 개발된 TDLAS 시스템과 알고리즘은 다양한 분야의 온도장과 농도장의 계측이 가능하며, 앞으로 다양한 종의 농도측정에도 활용될 수 있을 것으로 보인다. 추후 과제로 대각선 레이저의 정보를 해석영역에 추가시키거나 3차원으로 배열을 시킴으로 더 우수한 공간분해능을 갖춘 CT-TDLAS의 시스템 개발을 할 필요가 있다.

## 참고 문헌

- [1] V. John, 2008, *True scale of CO<sub>2</sub> emissions from shipping revealed*, theguardian, Available at : <https://www.theguardian.com/environment/2008/feb/13/climatechange.pollution>
- [2] C. B. Lim, W. Wang, S. S. Yang, K. K. Lee, 2009, Development of SAW-based Multi-gas Sensor for Simultaneous Detection of CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol.154, No.1, pp.9-16.
- [3] G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja, R. Binions, 2010, Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring, *Sensors*, Vol.10, pp.5469-5502.
- [4] S. Chen, 2010, Surface Micromachined Thermal Conductivity Gas Sensors for Hydrogen Detection, PhD. Dissertation, TU Delft.
- [5] N. Dossi, R. Toniolo, A. Pizzariello, E. Carrilho, E. Piccin, S. Battiston, G. Bontempelli, 2012, An Electrochemical Gas Sensor based on Paper Supported Room Temperature Ionic Liquids, *Lab on a Chip*, Vol.12, No.1, pp.153-158.
- [6] Y. Yuki, A. Murata, 2010, Optimum Combustion Control by TDLS200 Tunable Diode Laser Gas Analyzer, *Yokogawa Technical Report English*

*Edition*, Vol.53, No.1, pp.19-22.

[7] Y. Deguchi, Y. Daisuke, A. Akira, 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.

[8] T. Kamimoto, Y. Deguchi and Y. Kiyota, 2015, High temperature field application of two dimensional temperature measurement technology using CT tunable diode laser absorption spectroscopy, *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 46, pp.51-57.

[9] Y. Deguchi, 2011, *Industrial applications of Laser Diagnostics*. CRS Press, Taylor & Francis.

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

[11] E. E. Whiting, 1968, An Empirical Approximation to the Voigt Profile, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 8, Issue 6, pp. 1379-1384.

[12] Y. Zaatar, J. Bechara, A. Khoury, D Zaouk, J. P. Charles, 2000, Diode laser sensor for process control and environmental monitoring, *Applied Energy*, 65, pp. 107-113.



- [13] L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe, D. ChrisBenner, P. F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L. R. Brown, A. Campargue, J. P. Champion, K. Chance, L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, S. Fally, J. M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. 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, 2009 The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 110: pp. 533-572.
- [14] D. W. Choi, M. G. Jeon, G. R. Cho, T Kamimoto, Y. Deguchi, 2016, Performance improvements in temperature reconstructions of 2-D tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), *Journal of Thermal Science*, Vol.25, pp. 84-89.
- [15] D. H. Doh, C. J. Lee, G. R. Cho, K. R. Moon, 2012, Performances of Volume-PTV and Tomo-PIV, *Journal of Fluid Dynamics* Vol.2 No.4A, pp. 368-374.
- [16] J. Song, Y. Hong, G. Wang and H. Pan, 2013, Algebraic tomographic reconstruction of two dimensional gas temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy. *Applied Physics B: Lasers and*

Optics, Vol.112, No.4, pp. 529-537.

[17] X. Liu, J. B. Jeffries, R. K. Hanson, K. M. Hinckley, M. A. Woodmansee, 2006, Development of a tunable diode laser sensor for measurement of gas turbine exhaust temperature, *Applied Physics B* 82, pp. 469-478.

[18] X. Zhou, X. Liu, J. B. Jeffries, R. K. Hanson, 2003, Development of a sensor for temperature and water concentration in combustion gases using a single tunable diode laser, *Measurement Science and Technology*, Vol. 14 No. 8, pp. 1459-1468.

[19] F. Wang, K. F. Cen, N. Li, J. B. Jeffries, Q. X. Huang, J. H. Yan, and Y. Chi, 2010, Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode laser absorption spectroscopy, *Measurement Science and Technology*. 21, 045301 (10pp).

[20] F. Wang, Q. Wu, Q. Huang, J. Yan, and K. F. Cen, 2015, Simultaneous measurement of 2 dimensional H<sub>2</sub>O concentration and temperature distribution in premixed methane/air flame using TDLAS-based tomography technology, *Optics Communications*, Vol.346, No.1, pp. 53-63.

[21] P. Wright, N. Terzija, J. L. Davidson, S. Garcia-Castillo, C. Garcia-Stewart, S. Pegrum, S. Colbourne, P. Turner, S. D. Crossley,

T. Litt, S. Murrayc, K. B. Ozanyana, and H. McCanna, 2010, High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine, *Journal of Chemical Engineering*, 158(1), pp. 2-10.

[22] L. Ma and W. Cai, 2008, Numerical investigation of hyperspectral tomography for simultaneous temperature and concentration imaging, *Applied Optics*, Vol. 47 No 21, pp. 3751-3759.

[23] L. Ma, W. Cai, 2008, Determination of the optimal regularization parameters in hyperspectral tomography, *Applied Optics*, Vol. 47, No. 23, pp. 4186-4192.

[24] L. Ma, X. Li, S. T. Sanders, A. W. Caswell, S. Roy, D. H. Plemmons and J. R. Gord, 2013, 50-kHz-rate 2D imaging of temperature and H<sub>2</sub>O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography. *Optics Express*, Vol.21, No.1, pp. 1152-1162.

[25] W. Cai and C. F. Kaminski, 2014, Multiplexed absorption tomography with calibration-free wavelength modulation spectroscopy, *Applied Physics Letters*, Vol.104, No.15, pp. 154106.

[26] W. Cai and C. F. Kaminski, 2015, A tomographic technique for the simultaneous imaging of temperature, chemical species, and pressure in reactive flows using absorption spectroscopy with frequency-agile lasers, *Applied Physics Letters*, Vol.104, No.3, pp.034101.

- [27] W. Cai and C. F. Kaminski, 2015, A numerical investigation of high resolution multispectral absorption tomography for flow thermometry, *Applied Physics B*, Vol.119, No.1, pp. 29-35.
- [28] H. McCann, P. Wright and K. Daun, 2015, Chemical species tomography, *Industrial Tomography: Systems and Applications*, Inc. Elsevier, pp. 135-174.
- [29] A. Seidel, S. Wagner, A. Dreizler and V. Ebert, Robust, 2015, spatially scanning, open-path TDLAS hygrometer using retro-reflective foils for fast tomographic 2D water vapor concentration field measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 8, No.5, pp. 2061-2068.
- [30] V. L. Kasyutich and P. A. Martin, 2011, Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.102, No.1, pp. 149-162.
- [31] Y. Deguchi, T. Kamimoto and Y. Kiyota, 2015, Time Resolved 2D Concentration and Temperature Measurement using CT Tunable Laser Absorption Spectroscopy. *Flow Measurement and Instrumentation*, In press.
- [32] J. Shao, L. Wang and C. Ying, 2015, Numerical investigation of the

two-dimensional gas temperature distribution based on tunable diode laser absorption spectroscopy. *Optica Applicata*, Vol.45, No.2, pp. 183–198.

[33] Y. Hong, J. Song, G. Wang and H. Pan, 2015, Optimal beam arrangement design for two dimensional temperature and concentration reconstruction using ASA and SQP algorithms. *Optik*, Vol.126, No.2, pp. 292–296.

[34] S. A. Tsekenis, N. Tait and H. McCann, 2015, Spatially resolved and observer-free experimental quantification of spatial resolution in tomographic images. *Review of Scientific Instruments*, Vol.86, No.3, pp. 035104.

[35] T. Kamimoto, Y. Deguchi, D. W. Choi, D. Yasui, J. H. Shim, 2014, Accuracy Verification on 2D Temperature Measurement Method Using CT-tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.45, No.1.

[36] C. Liu, L. Xu, Z. Cao and H. McCann, 2014, Reconstruction of Axisymmetric Temperature and Gas Concentration Distributions by Combining Fan-Beam TDLAS With Onion-Peeling Deconvolution, *Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.63, No.12, pp. 3067–3075.

[37] X. An, T. Kraetschmer, K. Takami, S. T. Sanders, L. Ma, W. Cai, X. Li, S. Roy and J. R. Gord, 2011, Validation of temperature imaging by H<sub>2</sub>O absorption spectroscopy using hyperspectral tomography in controlled experiments, *Applied Optics*, Vol.50, No.40, pp. A29-A37.

[38] 김광남, 2016, 레이저흡수법(TDLAS)기반 온도장 농도장 측정법 성능 평가, 석사학위논문 부산:한국해양대학교.

[39] 김동혁, 2007, 다이오드 레이저를 이용한 배기가스 계측에 관한 연구. 석사학위논문. 서울:한양대학교.

[40] 차학주, 2004, 파장 가변용 다이오드 레이저 시스템(TDLAS)을 이용한 이산화탄소의 농도 계측에 관한 연구, 석사학위논문. 서울:연세대학교.

## 감사의 글

5년간의 힘겨웠던 박사과정의 연구로부터 박사학위 논문이라는 영광스러운 결실을 거두게 되었습니다. 논문을 완성하기까지 너무나 많은 도움을 주신 분께 부족하지만 감사의 마음을 글로 전하게 되었습니다. 저를 연구자의 길로 이끌어주시고 항상 지도해주시고 가르침을 주신 심준환 지도교수님과 도덕희 교수님께 진심으로 감사함을 드립니다. 유학시절 본 연구의 시작부터 지도해주신 대구치 교수님과 열과 성의로 논문을 심사해주신 박동국 교수님, 김웅수 교수님, 실질적인 연구에 조언과 격려를 아낌없이 해주신 조정래 박사님께도 진심으로 감사를 드립니다.

연구실에서 어려운 길을 함께한 경화와 연구실 후배들, 일본에서 유학중인 민규, 유동가시화 연구실 후배 모두에게도 자신이 걷는 길에 좋은 추억들 많이 남기길 바라며, 앞날의 좋은 일들만 가득하길 기원합니다.

지금까지 묵묵히 지켜봐주시고 한결같은 사랑을 베풀어주신 양가 부모님께도 감사드리며, 나를 믿고 함께해준 사랑하는 아내에게 진심으로 고맙다고 말하고 싶다. 마지막으로 힘들고 어려울 때도 많았지만 힘이 되어주시고 늘 사랑으로 축복해주신 성삼위와 주님께 감사와 사랑의 마음을 담아 이 논문을 바칩니다.

한국해양대학교 전자통신공학과 박사학위 논문에서 written by 최두원