



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

레이저흡수법(TDLAS)기반 온도장 농도장 측정법
성능 평가

Evaluations on Performances of a Measurement Technique for
Temperature and Concentration Fields Based on a TDLAS(tunable
diode laser absorption spectroscopy)



2016년 2월

한국해양대학교 대학원

에너지플랜트공학과

김 광 남

목 차

List of Tables	i
List of Figures	ii
Abstract	iii

제1장 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
1.3 연구 구성	4

제2장 온도장 농도장 측정법의 이론적 배경

2.1 Lambert-Beer' s law	5
2.2 선 강도(Line strength)	8
2.3 선형 함수(Lineshape function)	12
2.3.1 Gaussian lineshape function	13
2.3.2 Lorentzian lineshape function	16
2.3.3 Voigt lineshape function	20
2.4 Template Matching Method (Normalized Cross Correlation)	24
2.5 Tomographic reconstruction (ART & MART method)	26

제3장 수증기(H₂O)의 팬텀(Phantom) 데이터 구축 및 성능평가

3.1 팬텀 온도장 농도장 모델링	28
3.3 선 강도 계산	30
3.3 선형 함수 적용	33
3.4 NCC를 이용한 흡수량 계산	43
3.5 MART법 적용 및 결과	45

제4장 결론 및 고찰	50
-------------------	----

참고문헌	51
------------	----



List of Tables

Table 2.1	Coefficients of the polynomial expression for the partition of H_2O	11
Table 3.1	The information related to absorption data	31



List of Figures

Fig. 2.1 Schematic diagram of Lambert-Beer' s law	7
Fig. 2.2 FWHM(Full Width at Half Maximum) of Gaussian lineshape function	14
Fig. 3.1 Temperature distribution	29
Fig. 3.2 Absorption intensity of H ₂ O vapor for wave numbers	30
Fig. 3.3 Schematic diagram of absorption	34
Fig. 3.4 The calculated absorption graphs of H ₂ O spectrum at 1338.0~1388.5nm from phantom temperature at the horizontal 1~11 paths	35
Fig. 3.5 The calculated absorption graphs of H ₂ O spectrum at 1338.0~1388.5nm from phantom temperature at the vertical 1~11 paths	39
Fig. 3.6 Calculation process of the template matching method (Normalized Cross Correlation Method)	44
Fig. 3.7 Process of iteration about T, n	46
Fig. 3.8 Result of iterative calculation	47
Fig. 3.9 Pattern changes at low temperature and high temperature	49

Evaluations on Performances of a Measurement Technique for Temperature and Concentration Fields based on a TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy)

Kim, Kwang Nam

Department of Energy Plant Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The purpose of this paper is to evaluate the performance of the calculation algorithm of the TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy). Previous calculation algorithms used for reconstructing the temperature and concentration fields in the TDLAS utilize the peak intensity information of the representative waves at 1388.135nm and 1388.326nm for the case of H₂O vapor. In this paper, a new method in which correlation coefficients between the wave patterns obtained by experiments and those obtained by theoretically calculated values are used for reconstructing the temperature and concentration fields is

proposed. That is, the light intensities obtained from experiments and were compared with those obtained from the theory were matched to get final matched patterns. For reconstructing the temperature and concentration fields, the MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) which is widely used for CT-based reconstruction algorithms was used. Calculation errors are relatively larger at higher at higher temperature zone than lower temperature zones. It was verified that larger errors at high temperatures was due to a very weak intensity change.



KEY WORDS: Tunable diode laser absorption spectroscopy 가변 다이오드 레이저 흡수 분광법; Normalized cross correlation 정규화된 상호상관도; Computed tomography 컴퓨터 단층촬영; MART method 곱셈 산술 재건법; Exhaust gas 배기가스.

제1장 서론

1.1 연구 배경

2005년 2월 16일 유엔기후협약인 교토의정서의 공식효력이 발하면서, 2013년 1월 1일부터는 온실가스 감축량을 의무적으로 시행해야 한다. 국제적 입출항이 잦은 선박의 경우, 그 규제가 매우 엄격하여 2013년 1월 1일부터 건조되는 선박은 국제해양오염방지협약에 의거하여 에너지효율증서(IEE, international energy efficiency)를 검사기관으로부터 받아야만 항해가 가능하게 되었으며, 정밀하게 선박배출 가스를 측정할 수 있는 장치에 대하여 시장의 요구가 증대하고 있다.

선박배출 가스 성분분석을 위한 기존의 측정방식은 접촉식 1점(pointwise)에 의한 것이므로 배출되는 가스의 농도 분포가 균일하지 않은 실제의 상황에 대하여 정확한 가스배출량을 산정할 수 없다.

가스농도를 측정하는 방식으로서 1점(pointwise)에서 측정하는 방법이 있다. 이 방법은 1점 만에 대한 정보를 이용하는 관계로 가스배출량 산정에 필요한 단면상의 정보를 추출해 낼 수 없는 한계를 지닌다. Zhou, et al. (2003)은 1점 표본점에 대한 배기가스에 포함된 농도만을 측정한 사례이다. 대표적 국내연구 성과로서 김동혁 등(2006)은 1점 표본점에 대한 이산화탄소의 농도를 측정한 사례로서 위의 연구와 같은 한계를 지닌다.

이를 극복하기 위하여 Deguchi, et al. (2012)은 TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy)법과 CT(computed tomography)법을 이용하여 가스의 2차원 온도와 농도분포를 산정해 내는 기법을 구현하였다. 이들의 연구는 가스가 특정 주파수에서 흡수강도(absorption intensity)의 비(ratio)를 이용하여 온도를 계산하는 방식을 채택하고 있다. 이 방법은 실제 측정데이터로부터 최대치만을 이용하는 관계로, 측정단면상의 온도분포를 계산함에 있어서 고온부에서의 오차를 줄이기 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 가스 연소장을 통과한 레이저 빛의 흡수강도 최대값을 이용하는 대신에, 레이저 빛의 파장에 따른 패턴(pattern)을 그대로 적용함으로써, 온도장 계산에 있어서 정확도를 향상시키는데 연구의 목적으로 삼고 있다.

1.2 연구 목적

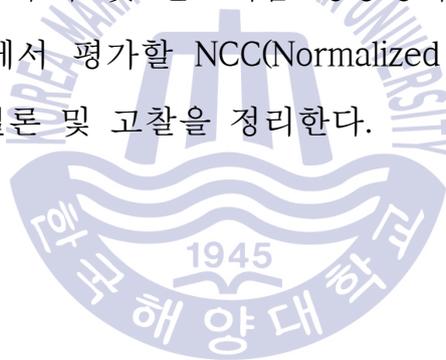
본 연구에서는 연소장을 통과한 레이저 빛의 파장에 따른 흡수패턴 (pattern)과 이론적으로 구해지게 되는 흡수패턴과의 상관도를 계산함으로써 온도장 계산에 있어서 정확도를 향상시키는데 연구의 목적으로 삼고 있다.



1.3 연구의 구성

본 논문은 온도장 농도장 계산 기술을 향상시키고, CT 재건을 통해 알고리즘의 성능평가 하는 것을 연구의 목적으로 삼고 있다. 이를 달성하기 위한 연구 진행 내용의 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적에 대하여 소개하고, 제2장에서는 온도장 농도장 측정법의 이론적 배경을 설명한다. 제3장에서는 수증기(H_2O)의 팬텀(Phantom) 데이터 구축 및 알고리즘 성능평가를 다룬다. 마지막으로 제4장에서는 본 논문에서 평가할 NCC(Normalized Cross Correlation)법을 적용한 결과에 대한 결론 및 고찰을 정리한다.



제2장 온도장 농도장 측정법의 이론적 배경

2.1 Lambert-Beer's law

흡수 분광학의 기본 이론은 Lambert-Beer의 법칙으로 설명 가능하다. 레이저흡수법(TDLAS)은 종(Species)들의 온도와 농도를 측정하고자 할 때, 이 기본 법칙을 사용한다. Fig. 2.1과 같이 빛이 흡수 매체로 스며들 때, Lambert-Beer의 법칙에 따라 흡수·투과된 빛의 세기는 매질의 농도와 관련이 있으며, α_λ 는 가스의 농도와 온도의 함수로 나타내는 흡수계수(Absorption coefficient)이다. 측정된 n종의 개수밀도는 흡수된 빛의 양 $I(\lambda)$ 와 연관되어 있으며, 그 관계식은 식 (2.1)과 같다. 또한 식 (2.2)와 같이 투과된 신호와 레이저 방출 신호의 강도비로 나타내며, 농도와 온도의 함수로 표현한다.

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

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

$I_o(\lambda)$ is Incident light intensity;

$I_t(\lambda)$ is Transmitted light intensity;

α_λ is Absorbance;

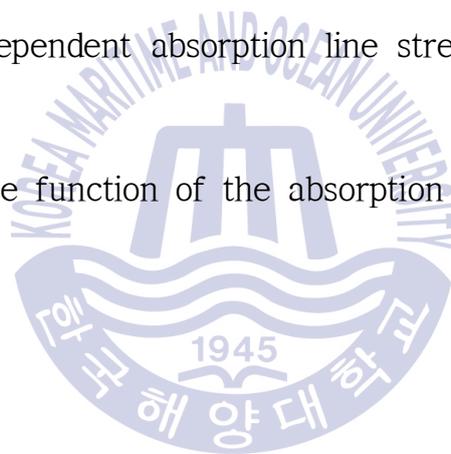
n_i is Number of density of species 'i' ;

P is Pressure;

L is Length of light path;

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

$G_{Vi,j}$ is Voigt lineshape function of the absorption line 'i' , 'j' .



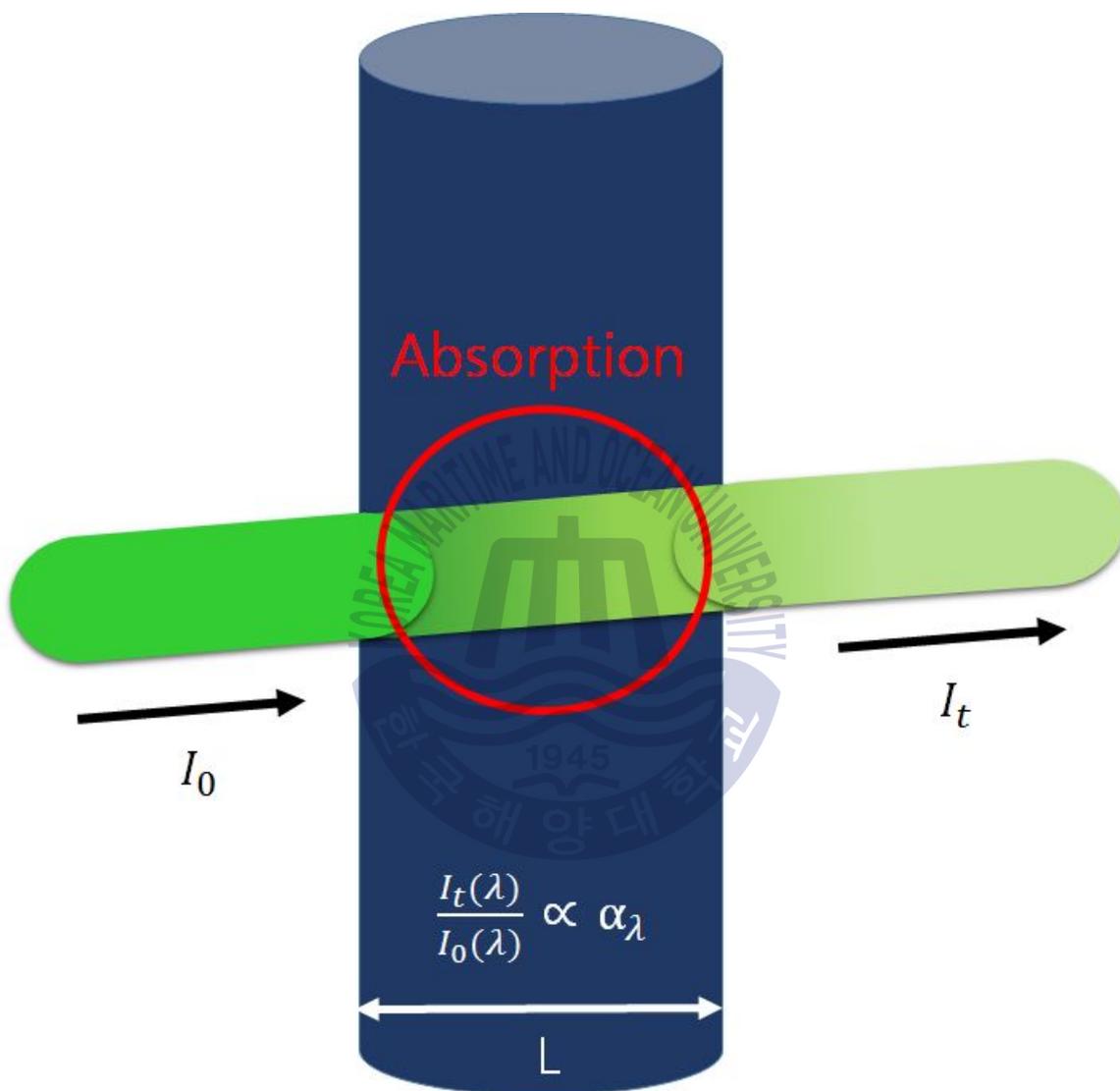


Fig. 2.1 Schematic diagram of Lambert-Beer's law

2.2 선강도(Line-strength)

선강도의 정의에 대한 연구결과를 아래와 같이 전개한다. (전민규, 2014 cited in 김동혁, 2007) 흡수 천이의 세기(strength)는 분광학적 선강도(Spectra line-strength)로 표현한다. 선강도의 기본적인 단위는 압력에 따른 $S[cm^{-2}atm^{-1}]$ 와 스탠포드 대학에서 제공하는 각 분자별 파장에 대한 HITRAN(High resolution Transmission)에 의해 산출되는 수밀도 단위의 식 (2.3), $S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}]$ 로 나타낸다.

$$S[cm^{-2}atm^{-1}] = \frac{S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}] \times n[mol/cc]}{P[atm]} \quad (2.3)$$

식 (2.3)에서 n 은 수 밀도(Number density) [$molecules/cc$]이고, P 는 압력 [atm]을 나타낸다. 식 (2.3)에서 이상 가스 상태방정식을 적용하고, 압력의 단위를 [$dynes/cm^2$]에서 [atm]으로 전환하면 다음과 같은 관계식인 식 (2.4)이 된다.

$$S[atm^{-2}atm^{-1}] = \frac{S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}] \times 1013250 [dynes/(cm^2 \cdot atm)]}{kT} \quad (2.4)$$

여기서, $k(= 1.38054 \times 10^{-16} [erg/K])$ 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant)를

나타내고, T[K]는 대상가스의 온도 값이다. 식 (2.4)에서 볼츠만 상수 값을 대입하여 정리하면 식 (2.5)같이 간소화 된다.

$$S = \frac{S^* \times (7.34 \times 10^{21})}{T} [cm^{-2}atm^{-1}] \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 상온 (room-temperature : 296K)을 고려하면 (T = 296K) 다음과 같은 식 (2.6)을 얻을 수 있다.

$$S = S^* \times (2.488 \times 10^{19}) [cm^{-2}atm^{-1}] \quad (2.6)$$

선 강도는 분자가 빛 에너지를 흡수하는 상태에서 분자들의 볼츠만 분포 (Boltzmann fraction)에 의해 좌우되기 때문에 온도의 함수가 된다. 온도 T에서의 특정 천이 v에 대한 선강도 $S_v(T)$ 는 분자의 기준 온도(T_0)에서의 선강도(S_v), 흡수하는 분자의 부분 함수 (Q), 천이 주파수 (V_0) 그리고 천이의 저 준위 에너지 (E')에 의해 결정되어지며, 관계식은 다음 식 (2.7)과 같다.

$$S_v(T) = S_v(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp \left[- \frac{hcE'}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (2.7)$$

$$\times \left[1 - \exp\left(\frac{-hcV_{0,v}}{kT}\right) \right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hcV_{0,v}}{kT_0}\right) \right]^{-1}$$

h is Planck's Constant, $h = 6.6256 \cdot 10^{-27} [\text{erg} \cdot \text{s}]$;

k is Boltzmann's constant, $k = 1.38054 \cdot 10^{-16} [\text{erg}/\text{K}]$;

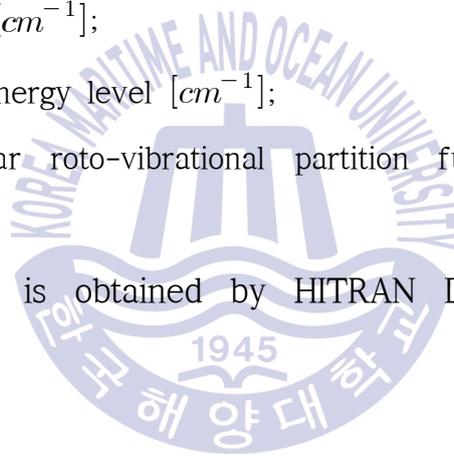
c is the light speed, $c = 3.0 \cdot 10^{10} [\text{cm}/\text{s}]$;

ν_0 is the line strength [cm^{-1}];

E'' is the lower-state energy level [cm^{-1}];

$Q(T)$ is the molecular roto-vibrational partition function at a particular temperature T .

The value of $S_v(T)$ is obtained by HITRAN Database (from Harvard University, website)



분배함수에 대한 연구결과는 아래의 Table 1과 같으며, 미지수 a, b, c, d 에 대한 값은 온도별로 나열하였다. (Zhou, et al., 2003)

Table 2.1 Coefficients of the polynomial expression for the partition of H_2O .

Coefficients	$70 < T < 405K$	$400 < T < 1500K$	$1500 < T < 3005K$
a	-0.44405×10^1	-0.94327×10^2	-0.11727×10^4
b	0.27678×10^0	0.81903×10^0	0.29261×10^1
c	0.12536×10^{-2}	0.74005×10^{-4}	-0.13299×10^{-2}
d	-0.48938×10^{-6}	0.42437×10^{-6}	0.74356×10^{-6}

2.3 선형함수(Lineshape function)

선형함수의 정의에 대한 연구결과를 아래와 같이 전개한다. (전민규, 2014 cited in 김동혁, 2007) 레이저 빔의 가스 분자에 의한 흡수에 의해 발생하는 선형함수의 선폭 증가는 온도와 압력 영향을 받음으로 농도 측정 오차가 발생될 수 있다. 이로부터 선형함수의 선폭 넓어짐 현상은 중요한 정보가 된다.

선폭의 넓어짐은 모든 분자들에 균일한 선폭 넓어짐(homogeneous broadening)과 다소의 분자 그룹에 불균일한 선폭 넓어짐(inhomogeneous broadening)으로 분류된다. 천이는 복합적 선형함수(multiple lineshape function)로 전환되어야만 할 것이다.

선형함수는 압력, 온도에 의한 함수로서, 압력과 온도에 따른 흡수신호의 크기 및 선폭의 변화 그리고 농도 측정에 사용되는 IAA(Integrated Absorbance Area)값의 변화 등으로 선박배출 가스 농도 측정을 고려하여야 할 사항이다.

2.3.1 Gaussian lineshape function

Gaussian 선형 함수는 아래와 같이 연구되어있다. (전민규, 2014 cited in 김동혁, 2007) Doppler broadening 같은 불균일한 선폭 넓어짐 (inhomogeneous broadening)의 구조로부터 나타내어진다. 가스 분자 그룹에 따라 그 선폭의 변화가 다르게 나타남을 말한다. 이러한 선폭의 넓어짐은 임의의 열운동(random thermal motion)에 의해 발생되며, 분자의 속도 분포를 통계 역학으로 표현하게 된다. 즉, 분자의 열운동(thermal motion)에 의해 발생하는 분자 속도에 따른 도플러 선형 함수(Doppler lineshape function)는 Fig. 2.2와 같이 전형적인 종 모양의 형태를 가진 Gaussian 곡선으로서 그려진다.

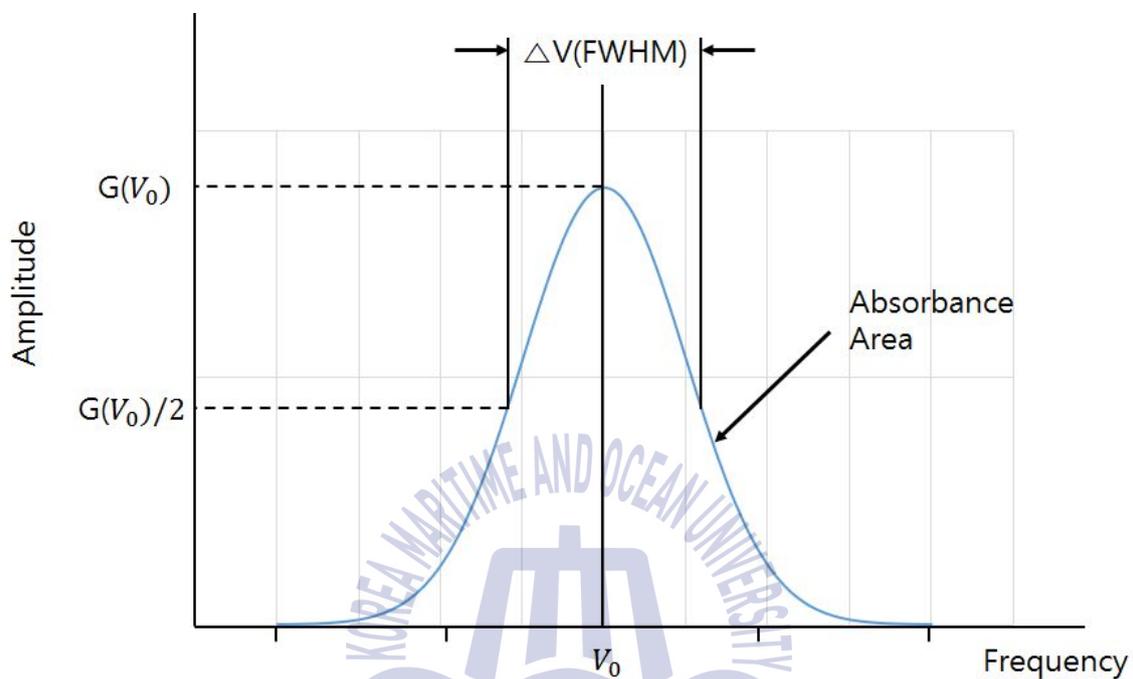


Fig. 2.2 FWHM(Full Width at Half Maximum) of Gaussian lineshape function.

식 (2.8)에서 ΔV_D 는 도플러 선폭(Doppler width)이라 하며, 선형 함수의 FWHM으로 나타낸다. 도플러 선폭(Doppler width)은 식 (2.9)와 같이 계산되어 진다.

$$G_D(V) = \frac{2}{\Delta V_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp - 4 \ln 2 \left(\frac{V - V_0}{\Delta V_D} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$\Delta V_D = V_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}} = 7.1623 \times 10^{-7} V_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2.9)$$

식 (2.9)에서 $V_0 [cm^{-1}]$ 은 중심 주파수(linecenter frequency)이며, $T[K]$ 는 온도 그리고 $M[a.m.u]$ 은 흡수하는 가스 분자의 분자량(molecular weight)을 나타낸다. 위의 식으로부터 가스의 온도가 클수록 도플러 선폭은 더욱 더 커지게 되어 흡수 신호의 선폭이 커지게 됨을 알 수 있다. 즉, 같은 농도의 가스 농도 측정 시 대상 가스의 온도 변화에 따라 그 오차 값이 발생할 수 있으며, 이는 측정 시 정밀도와 밀접한 관계를 가진다.

2.3.2 Lorentzian lineshape function

Lorentzian 선형 함수는 아래와 같이 연구되어있다. (전민규, 2014 cited in 김동혁, 2007) 가스 분자들로 인해 발생하는 흡수 신호는 계속적인 가스의 공급이 이루어지지 않을 경우 시간이 지남에 따라 그 흡수 되는 양이 작아지게 되고 선폭이 증가하게 된다. 이와 같은 자연적인 흡수 수명에 따른 선폭 넓어짐과 분자들의 운동에 의해 발생하는 분자 상호간의 충돌에 의한 선폭 넓어짐(collisional broadening)은 균일한 선폭 넓어짐과 선폭의 증가를 보인다. 이러한 선폭의 변화는 Lorentzian 선형 함수로서 표현되어지며, Heigenberg 불확실 이론에 의해 설명 가능하다.

$$\Delta V \geq \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.10)$$

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 brodening)으로서 선폭의 변화를 나타낼 수 있다. 자연적인 선폭 넓어짐은 Lonentzian 선형 함수로서 표현 가능 하다.

$$G_n(V) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta V_n}{2}}{(V - V_0)^2 + \left(\frac{\Delta V_n}{2}\right)^2} \quad (2.11)$$

식 (2.11)에서 $\Delta V_n [cm^{-1}]$ 은 “natural” 선폭 (FWHM)이며, $V_0 [cm^{-1}]$ 는 중심 주파수(linecenter frequency)를 나타낸다. 대부분의 경우에는 이러한 자연적 선폭 넓어짐(Natural broadening)은 비교적 긴 에너지 준위의 수명으로 인해 무시 가능하다.

충돌에 의한 선폭 넓어짐(Collisional broadening)은 중요한 균일 선폭 메커니즘이다. Collisional 선폭 넓어짐은 분자들 간의 상호 충돌에 의해 발생되며, 주로 이원자 분자에서 발생된다. 충돌의 존속 시간에 대한 선폭의 변화는 무시된다. 이러한 선형함수는 식 (2.12)와 같이 Lorentzian profile에 의해 나타낼 수 있다.

$$G_c(V) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Delta V_c}{2}}{(V - V_0)^2 + \left(\frac{\Delta V_c}{2}\right)^2} \quad (2.12)$$

여기서, $\Delta V_c [cm^{-1}]$ 는 collisional 선폭 (FWHM) 그리고 $V_0 [cm^{-1}]$ 는 중심 주파수(linecenter frequency)이다.

분자들 간의 상호충돌이 다른 두 종류 이상의 가스들 사이에서 발생하였을 경우, 이것을 “Process foreign gas broadening” 이라 하고, 동일한 가스 분자들 간의 충돌이 발생할 경우, “Self-broadening” 이라한다. 또한, 이원자 분자들 간의 충돌에 의한 선폭 넓어짐은 온도가 일정할 경우 압력에 비례하게 된다. 다종의 가스로 구성된 환경에서 총 충돌 선폭(collision width)은 식 (2.13)와 같다.

$$\Delta V_c = P \sum_j (X_j 2\gamma_j) \quad (2.13)$$

식 2.13에서 X_j 는 j 종 가스의 몰 분율(mole fraction)을 나타내며, $\gamma_j [cm^{-1}atm^{-1}]$ 는 충돌 선폭 넓어짐 계수(collisional broadening coefficient)이다. 온도에 따른 γ_j 는 다음 식 (2.14)로 표현된다.

$$\gamma_j(T) = \gamma_j(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_j} \quad (2.14)$$

식 (2.14)에서 T_0 는 기준 온도(reference temperature) 그리고 n_j 는 온도 의존 계수(coefficient of temperature dependence)로서 표현한다.

Lorentzian 선형 함수의 최고 높이(peak height)는 다음 식 (2.15)와 같다.

$$G_C(V_0) = \frac{2}{\Delta V_C \pi} \quad (2.15)$$



2.3.3 Voigt lineshape function

Voigt 선형 함수는 아래와 같이 연구되어있다. (김동혁, 2007) 도플러 선 폭 넓어짐(Doppler broadening)은 주로 낮은 압력 하에서 큰 영향을 주며, 분자 충돌에 의한 선폭 넓어짐(collisional broadening)은 높은 압력 하에서 주로 발생하게 된다. 그러나 일반적으로 분자들의 흡수에 의해 일어나는 흡수 신호의 선폭 넓어짐 현상은 자연 선폭 넓어짐(natural broadening), 분자 충돌에 의한 선폭 넓어짐(collision broadening), 그리고 도플러 선폭 넓어짐 (Doppler broadening)의 세 가지 선폭 넓어짐 현상이 종합적으로 발생하게 된다. 그러므로 이러한 세 가지 선폭 넓어짐 현상을 절충한 선형함수가 필요하다. 따라서 Gaussian 선형 함수와 Collisional 선형 함수를 절충한 선형함수 모델을 Voigt profile이라하며, 이에 대한 관계식은 식 (2.16)과 같다. 만약 선폭 넓어짐의 메커니즘이 독립적이라면, 선형함수는 Voigt profile은 다음과 같이 주어진다.

$$G_V(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_D(u)G_C(V-u)du \quad (2.16)$$

Voigt a 변수는 Doppler와 충돌에 의한 선폭 넓어짐의 상대적인 중요도를 나타내며, 충돌에 의한 선폭 넓어짐의 효과가 증가한다면 a 도 역시 증가하게 될 것이다.

$$a = \frac{\sqrt{\ln 2} \Delta V_C}{\Delta V_D} \quad (2.17)$$

w 변수는 흡수 라인 중심으로부터의 거리를 무 차원으로 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \frac{2\sqrt{\ln 2}(V - V_0)}{\Delta V_D} \quad (2.18)$$

그리고 적분 변수 y 는 다음 관계식으로 나타내어진다.

$$y = \frac{2u\sqrt{\ln 2}}{\Delta V_D} \quad (2.19)$$

중심 주파수 ν_0 에서의 Gaussian 크기

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

Voigt 함수의 형태는 흡수 분광학에서 대부분 정량 분석을 위한 이론으로 사용되어져 왔으나 실제 계측 시스템에서 정량 분석을 위한 Voigt 함

수로는 유용하지 않다. 그래서 실제 시스템에서는 다른 수치적 근사법을 적용하여 도출한, 보다 정확한 Voigt 함수를 적용한다.

Voigt선형 함수의 선폭 (FWHM)은 다음의 식 (2.21)을 이용하여 계산한다. [Olivero1977]

$$\Delta V_V = 0.5346 \Delta V_C + \sqrt{(0.2166 \Delta V_D^2 + \Delta V_D^2)} \quad (2.21)$$

이와 유사하게 Whiting방법을 이용한 선폭 (FWHM)은 다음의 식 (2.22)과 같다. (Zaatar et al., 2000)

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

Voigt선형 함수의 최고 높이(Peak height)는 식 (2.23)로서 나타내어진 다. [Mayinger2001]

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

식 (2.23)에서 $\beta = \left(\frac{V_{ED}}{(\Delta V_C + V_{ED})} \right)$ 이고, $V_{ED} = \frac{\Delta V_D}{\sqrt{\ln 2}}$ 이다. 또한

ΔV_D 와 ΔV_C 는 각각 Gaussian과 Lorentzian함수의 HWHM(half-width at half maximum)선폭이다. 본 연구에서는 온도에 의한 넓어짐, 압력에 의한 넓어짐을 모두 고려한 Voigt 선형 함수를 이용한다.



2.4 Template Matching Method (Normalized Cross Correlation)

템플릿 매칭(template matching)이란 참조 영상(reference image)에서 템플릿 영상(template image)과 매칭되는 위치를 탐색하는 방법이다. 쉽게 말해 같은 그림 찾기 과정이며, 일반적으로 템플릿 매칭은 이동(translation) 문제에 대해서는 쉽게 해결할 수 있는 반면, 회전 및 스케일링된 물체의 매칭은 어렵다. 템플릿 매칭에서 영상의 밝기를 그대로 사용할 수도 있고, 에지, 코너점, 주파수 변환 등의 특징 공간으로 변환하여 템플릿 매칭을 수행할 수 있으며, 영상의 밝기 등에 덜 민감하도록 정규화(normalized) 과정이 필요하다. 그 이유는 빛과 노출환경에 따라 이미지 매칭 성능이 매우 달라지기 때문이다. 따라서 템플릿 매칭을 수행하기 위해서는 첫 번째로 벡터의 길이를 1로 만드는 정규화 과정을 거친다. 이는 전형적으로 평균을 빼고 표준편차를 나누어 줌으로서 모든 단계에서 적용한다. 두 번째로는 상관량을 구한다. 템플릿 $t(x,y)$ 와 레퍼런스 $f(x,y)$ 의 정규화된 상호상관(Normalized Cross-Correlation)은 아래의 식 (2.24)와 같다.

$$\frac{1}{n} \sum_{x,y} \frac{(f(x,y) - \bar{f}) \cdot (t(x,y) - \bar{t})}{\sigma_f \sigma_t} \quad (2.24)$$

n 은 $t(x,y)$ 와 $f(x,y)$ 에서의 픽셀의 수이고, \bar{f} 는 f 의 평균, σ_f 는 f 의 표준 편차이다. 함수해석에서 이는 표준화 된 두 벡터의 내적으로 생각 할 수 있다. 결론적으로 정규화된 벡터를 각각 F 와 T 라 할 때, $F(x,y) = f(x,y) - \bar{f}$ 이고 $T(x,y) = t(x,y) - \bar{t}$ 이면 합은 $\langle \frac{F}{\|F\|}, \frac{T}{\|T\|} \rangle$ 와 같다. \langle, \rangle 는 내적을 의미하며 $\| \|$ 는 기하학 벡터의 최대값이다. 만약 f 와 t 가 실수 행렬 이라고 하면, 정규화 된 상관량은 단위벡터 F 와 T 사이의 코사인각과 같으며(내적), 위의 과정을 통해 두 함수간의 상관량을 측정하며, 기하학 상관량의 최대값을 얻게 된다.

본 논문에서는 HITRAN 흡수그래프 패턴과 팬텀 흡수그래프 패턴과의 템플릿 매칭을 통해 추적함으로써 온도를 구한다.

2.5 Tomographical reconstruction (ART & MART method)

대수적 영상구성기법은 컴퓨터 단층촬영(Computerized Tomography)에서 사용되는 반복적 알고리즘의 부류이다. 일련의 각이 진 영상으로부터 이미지들을 재구성한다. 이 방법은 선형대수학에서는 Kaczmarz method로 알려져 있다. (Herman & Gabor T, 2009) 토모그래피를 이용한 입자 재구성법은 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법과 MART(Multiply Algebraic Reconstruction Technique)법이 있으며, 두 가지 해석법 모두 초기 값과 참조 값의 편차가 최소가 되어 수렴할 때까지 반복적으로 계산하는 방법이다. ART법은 1차 방정식 시스템의 반복적 해결책으로 고려되며 고전적으로 가장 많이 사용되고 있다. ART법은 초기 값과 참조 값의 차를 이용하는 방법이며, 식 (2.25)로 표현된다.

$$\alpha_j(i)^{(k+1)} = \alpha_j(i)^{(k)} \times \beta \left[\frac{A_{j, \text{experiment}} - \sum_{i=1}^I \alpha_{j, \text{theory}}(i)^{(k)} \cdot L_{ij}}{\sum_{i=1}^I L_{ij}^2} \right] \quad (2.25)$$

k is iteration count;

i, j is horizontal, vertical laser path;

β is relaxation parameter;

L_{ij} is length of cell.

여기서 β (relaxation parameter)는 수렴속도에 영향을 주는 가중치이며, β 값은 0~1 사이의 값을 가진다. 위의 식은 가로레이저와 세로레이저 순번으로 계산을 실시한다. 새로운 흡수계수 $\alpha_j(i)^{(k+1)}$ 값으로 갱신되면 새로운 온도 값과 농도 값을 얻는다. 이와 같은 방법으로 계산된 값이 초기 값에 수렴할 때까지 반복 계산하여 오차가 최소일 때의 온도 값과 농도 값을 구한다. 다른 재건 방법에 비해 ART법의 장점은 재구성 과정에서 이전의 정보를 통합하기가 상대적으로 쉽다는 점이다. 하지만, 가중치를 곱함에도 불구하고 상대적으로 계산 값이 큰 경우 수렴 속도가 늦다. 이와 달리 MART법은 계조치 값과 계산된 값의 비를 이용하며, ART법에 비해 신속하게 계산 결과를 얻을 수 있다. 식 (2.26)는 MART법의 계산식을 나타낸다. 본 연구에서는 MART법을 이용하여 온도장 농도장을 재건한다.

$$\alpha_j(i)^{(k+1)} = \alpha_i(i)^{(k)} \times \left[\frac{A_{j, \text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{i, \text{theory}} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (2.26)$$

제3장 수증기(H₂O)의 팬텀(Phantom) 데이터 구축 및 성능평가

이 장에서는 가상의(Phantom) 온도장과 농도장 데이터를 이용하여 가로 11, 세로 11path 흡수레이저의 H₂O 흡수스펙트럼-흡수량 그래프를 만드는 과정과 계산 알고리즘을 평가하는 과정이 단계별로 전개된다.

3.1 팬텀 온도장 농도장 모델링

소형 선박 엔진에서 원형단면 배기구로 배출되는 가스의 최대온도(600K)를 모델링 하였으며, 외곽온도(300K)로 가정하였다. 그 후 Gaussian 함수를 적용하여 중심으로 갈수록 온도가 가우시안 분포형태로 높아지는 온도 분포를 Fig. 3.1과 같이 생성하였다.

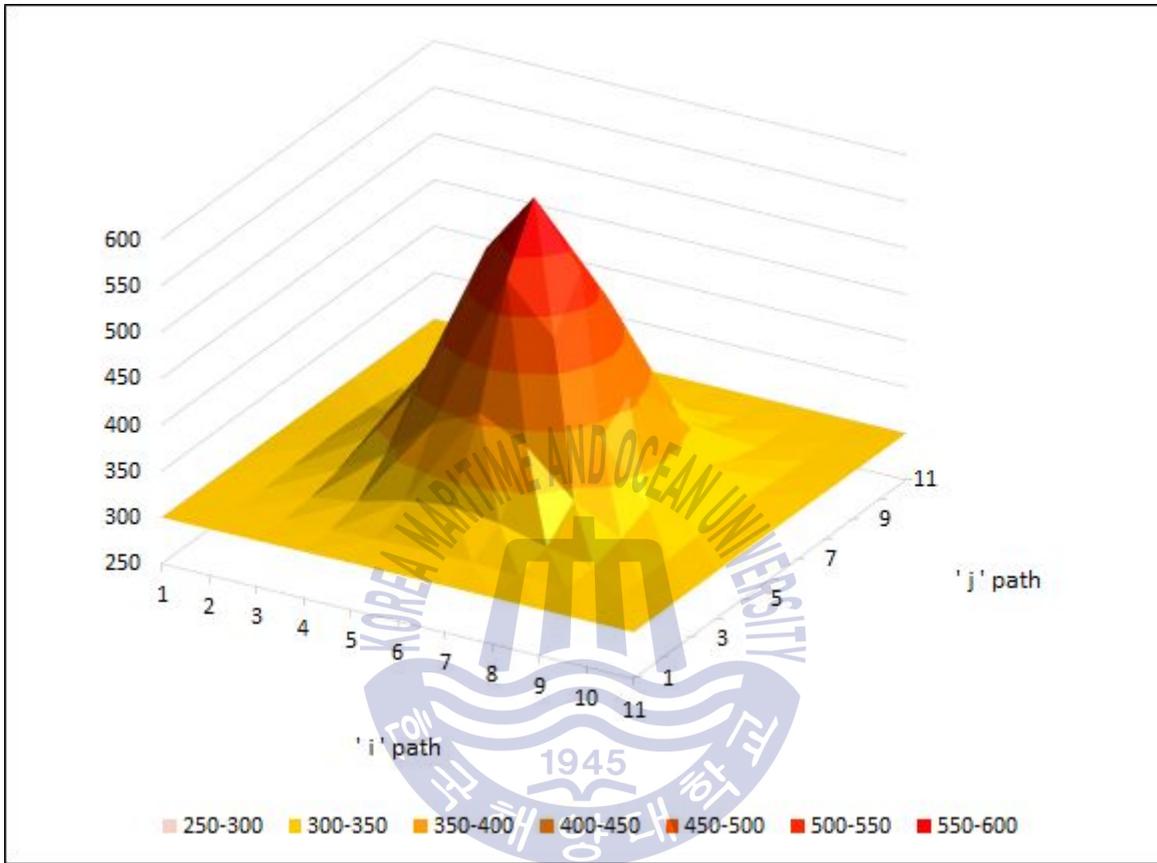


Fig. 3.1 Temperature distribution

11 X 11 (121개)의 형태로 모델링하였고, 각각의 셀은 가로와 세로 8mm 간의 간격을 가지며, 정사각형 mesh이다.

3.2 선 강도 계산

설정된 팬텀 온도장과 농도장의 정보로부터 HITRAN에서 제공하는 데이터베이스를 이용하면 H₂O 스펙트럼의 흡수강도를 계산할 수 있다. Fig. 3.2는 대표 파장수[cm⁻¹]별 수증기(H₂O)의 흡수량 그래프이다.

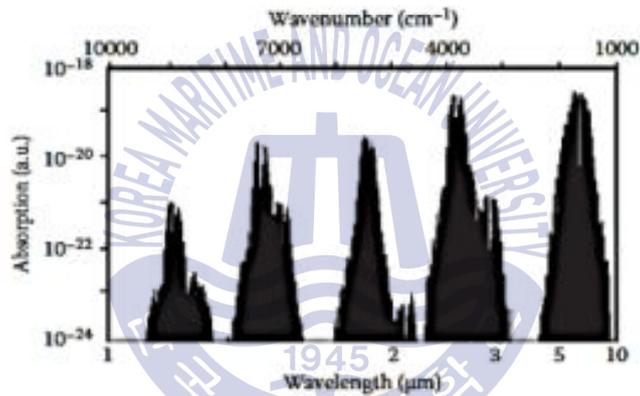


Fig. 3.2 Absorption intensity of H₂O vapor for wave numbers

또한 아래의 Table 3.1은 대표 파장[nm]별 수증기(H₂O)의 흡수량계산에 사용되는 파라미터들의 값을 보여준다.

Table 3.1 The information related to absorption data

Frequency [cm ⁻¹]	Wavelength [nm]	Line- Strength [cm ⁻¹ · atm ⁻¹]	E'' [cm ⁻¹]
7202.037	1388.496	9.18x10 ⁻¹⁰	3224.546
7202.060	1388.492	2.74x10 ⁻¹⁰	2495.166
7202.087	1388.486	3.56x10 ⁻⁴	136.1639
7202.256	1388.454	2.74x10 ⁻²	446.5107
7202.327	1388.440	3.76x10 ⁻⁵	488.1077
7202.448	1388.417	4.08x10 ⁻¹⁰	3135.764
7202.494	1388.408	9.78x10 ⁻¹⁰	2670.79
7202.583	1388.391	3.04x10 ⁻⁶	1201.921
7202.700	1388.368	1.64x10 ⁻⁷	1411.642
7202.722	1388.364	5.75x10 ⁻⁸	1817.451
7202.805	1388.348	1.07x10 ⁻⁹	3870.224
7202.909	1388.328	1.15x10 ⁻¹	70.0908
7202.911	1388.328	5.27x10 ⁻¹⁰	3216.193
7202.999	1388.311	1.68x10 ⁻⁶	1819.335
7203.037	1388.303	2.25x10 ⁻⁹	2586.529
7203.239	1388.264	8.58x10 ⁻⁸	2630.192
7203.265	1388.259	3.78x10 ⁻⁸	2053.969
7203.376	1388.238	1.74x10 ⁻⁹	3736.171
7203.450	1388.224	5.40x10 ⁻⁸	2552.857
7203.479	1388.218	5.30x10 ⁻¹⁰	2490.354
7203.635	1388.188	3.26x10 ⁻⁸	446.6966
7203.658	1388.184	1.58x10 ⁻⁴	1742.306
7203.763	1388.163	1.18x10 ⁻⁷	1131.776
7203.784	1388.159	8.38x10 ⁻⁶	2000.863
7203.822	1388.152	3.48x10 ⁻⁵	446.5107

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

1338.0-1338.5nm 파장 영역대의 40개의 일정간격을 가지는 각각의 파장에서 값을 선정하였으며, 가상의 온도장과 40개의 대표파장들의 정보를 이용하여 식 (2.7)를 이용하여 121개의 각각의 셀마다 선 강도 값을 계산하였다. 또한, 식 (2.7)에 제반되는 사항은 2.2장을 참조한다.

$$\begin{aligned}
 S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp \left[-\frac{hcE'}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \\
 \times \left[1 - \exp \left(\frac{-hcV_0}{kT} \right) \right] \left[1 - \exp \left(\frac{-hcV_0}{kT} \right) \right]^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

3.3 선형 함수 적용

레이저 빔이 매질에 조사(照査)되어 실제적으로 흡수 반응될 때, 선폭 증가는 선형 함수의 형태로 표현된다. 본 연구에서는 온도와 압력에 의한 선폭 증가 모두 내포하여 절충한 Voigt 선형함수를 사용하며, 식 (2.22)를 적용한다. (Zaatar et al., 2000)

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

현 단계까지의 이론들을 적용하여 TDLAS 기술의 핵심 이론인 Lambert-Beer의 법칙을 이용하여 각 path별 팬텀 흡수량을 구한다.

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

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

Fig. 3.2는 11 X 11 path (121 cell)의 형태의 이해를 돕기 위해 삽입하였으며, 가로축과 세로축에서 합쳐진 흡광도는 아래 식 (3.1)과 같다.

$$A_{\lambda,j} = \sum_i L_{i,j} \alpha_{\lambda,i} \quad (3.1)$$

또한 위의 식과 Lambert-Beer의 법칙을 이용하여 1388.0~1388.5영역에서 가로축, 세로축 22path의 팬텀흡수선 분포그래프는 Fig. 3.3에 나타내었다.

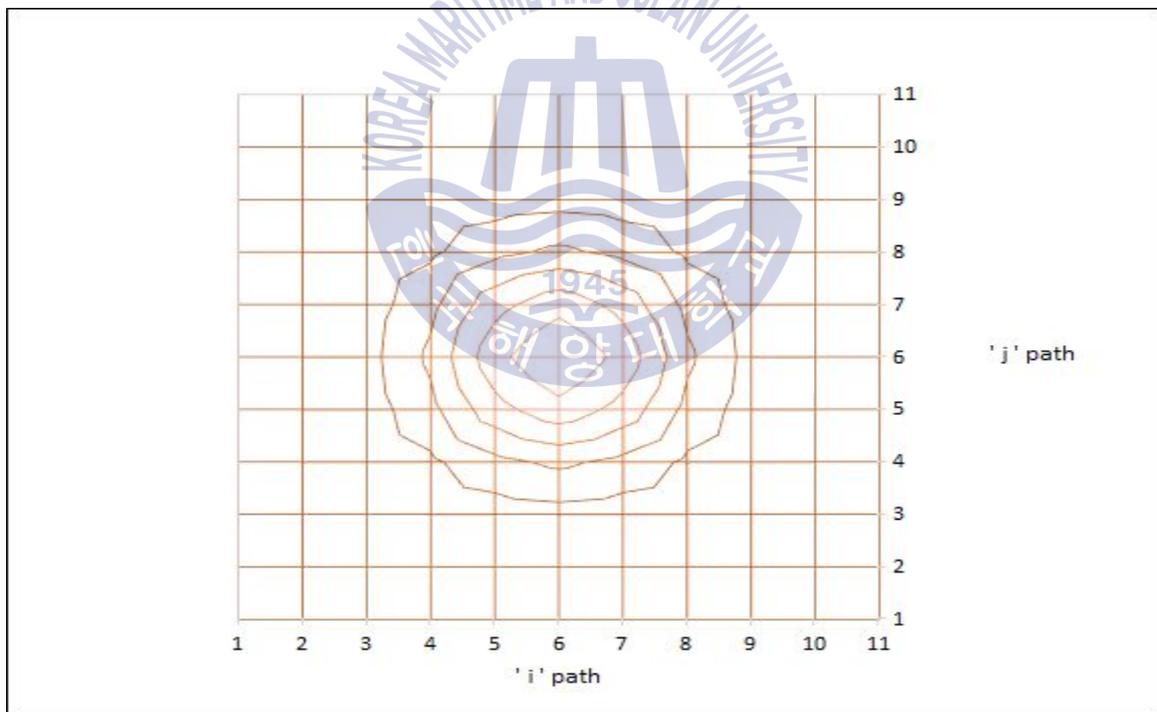


Fig. 3.3 Schematic diagram of absorption

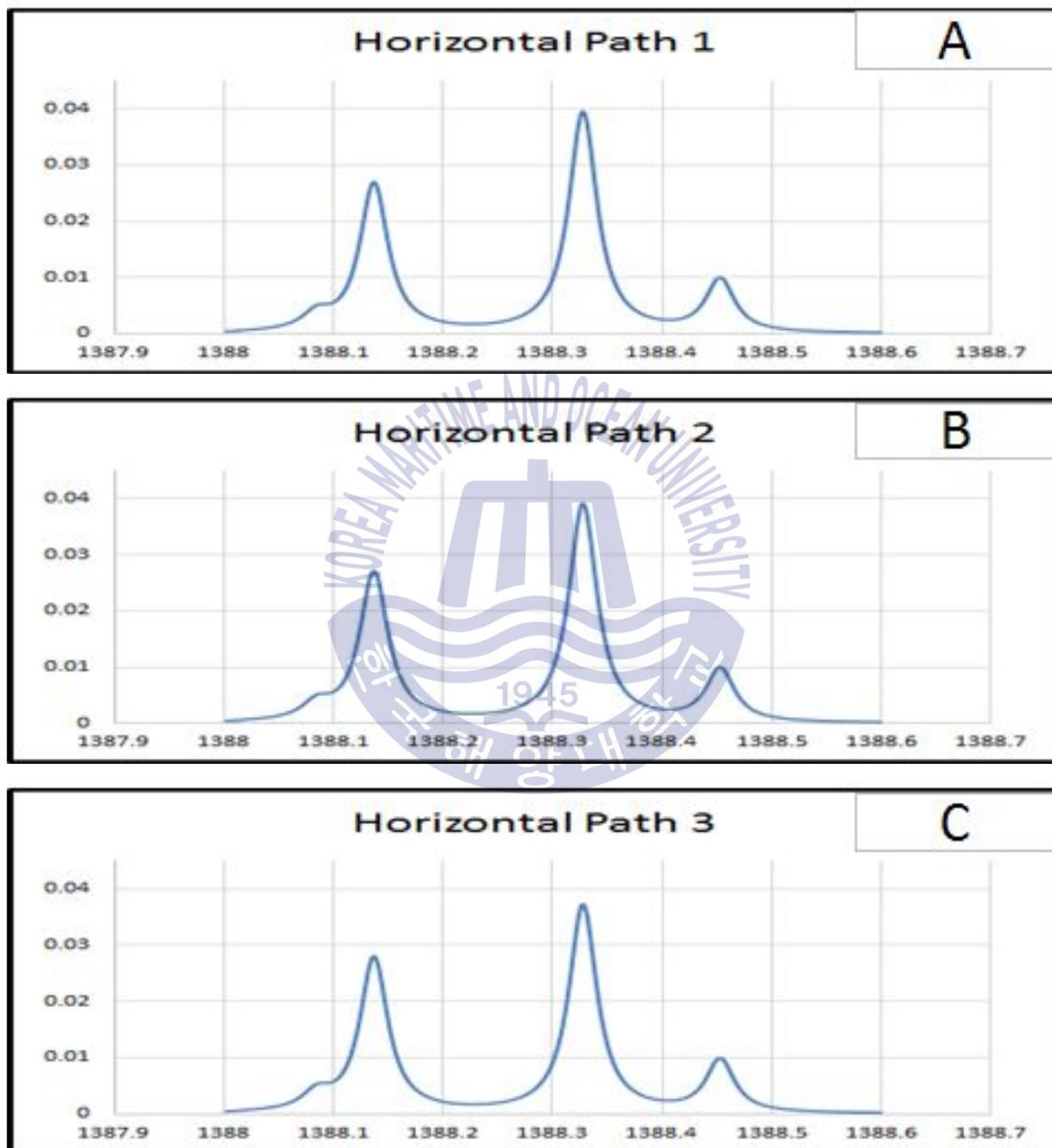


Fig. 3.4.1 The calculated absorption graphs of H₂O spectrum at 1388.0~1388.5nm from phantom temperature at the horizontal 1~3 paths

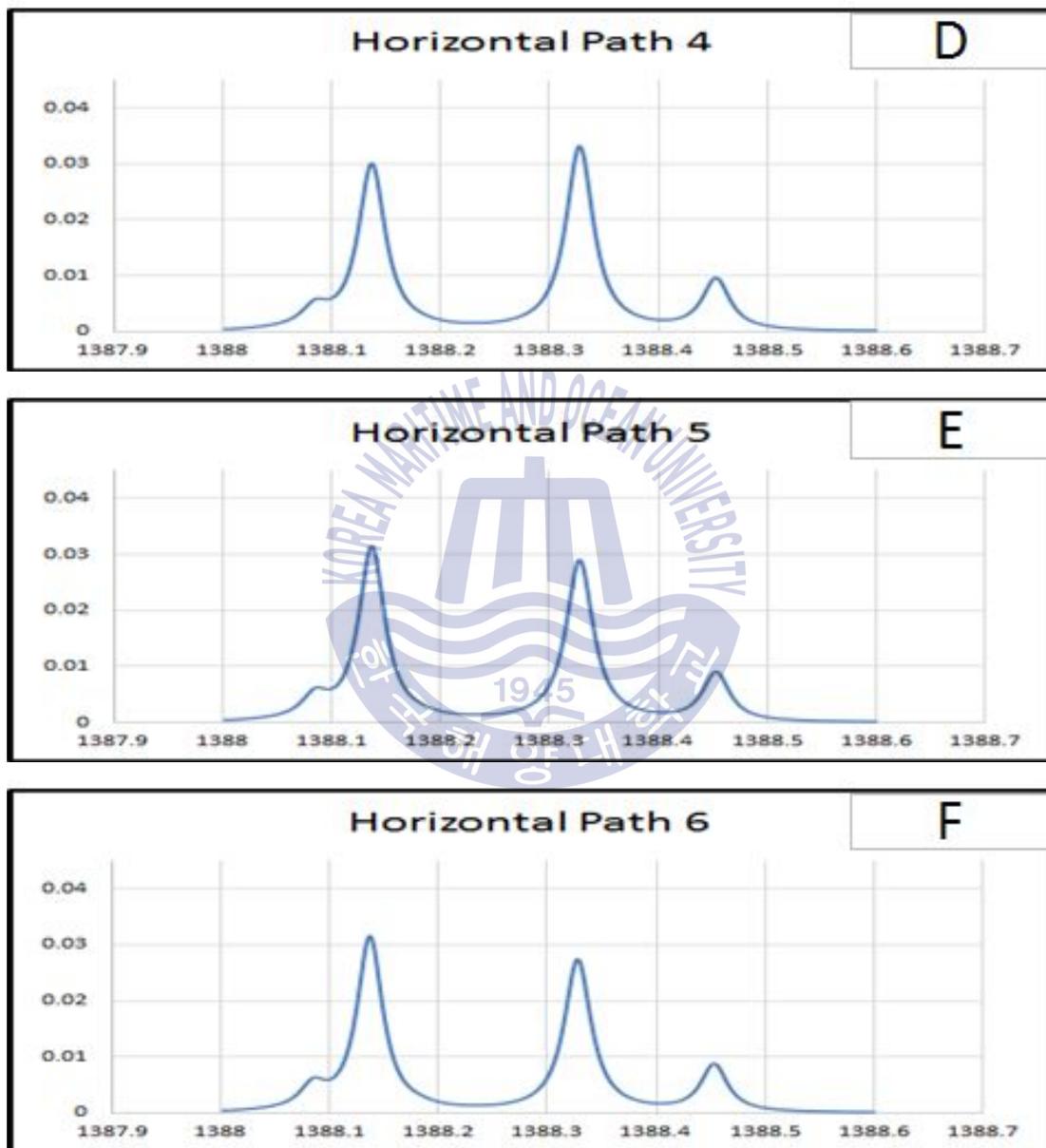


Fig. 3.4.2 The calculated absorption graphs of H_2O spectrum at 1388.0~1388.5nm from phantom temperature at the horizontal 4~6 paths

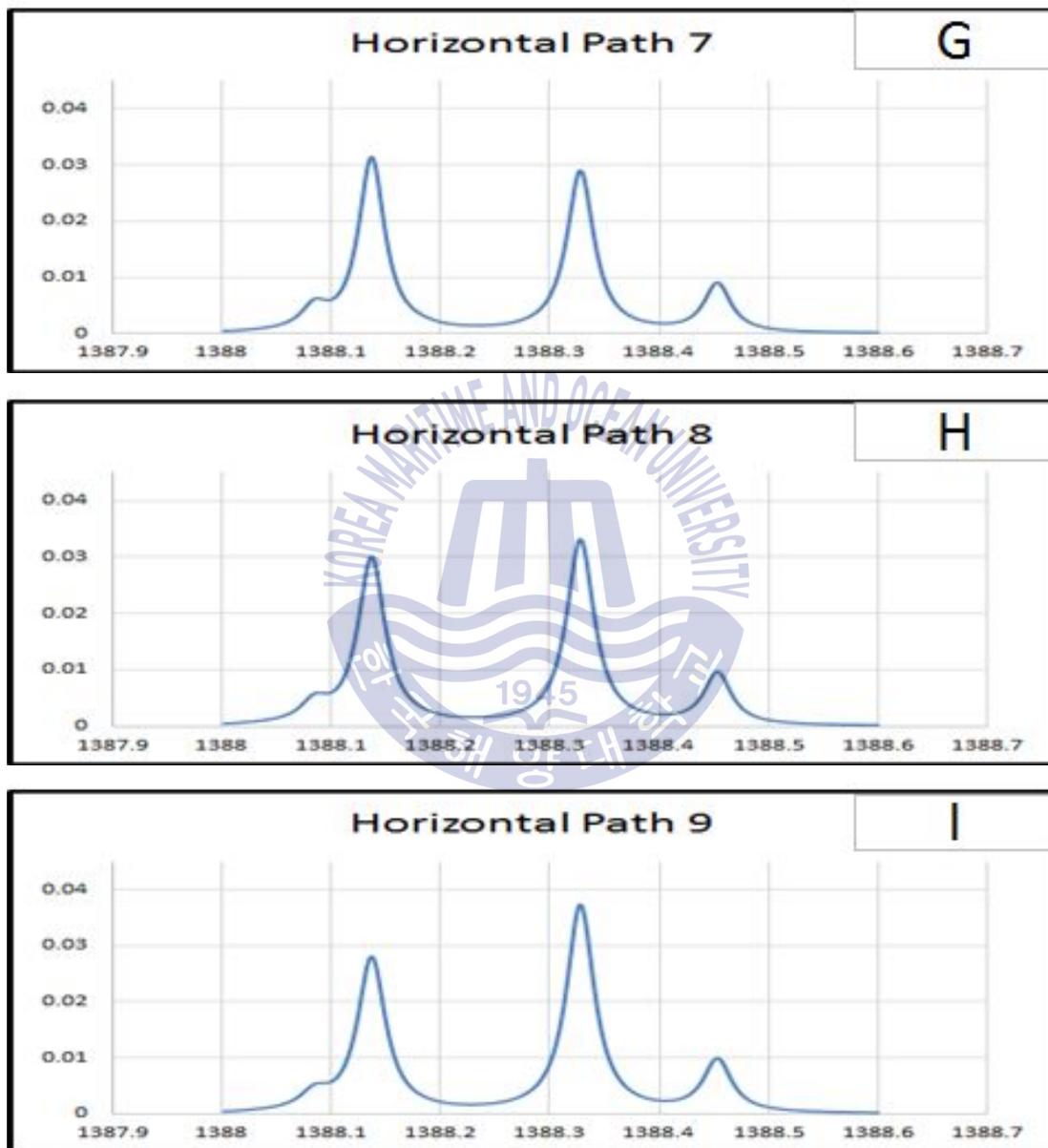


Fig. 3.4.3 The calculated absorption graphs of H₂O spectrum at 1388.0~1388.5nm from phantom temperature at the horizontal 7~9 paths

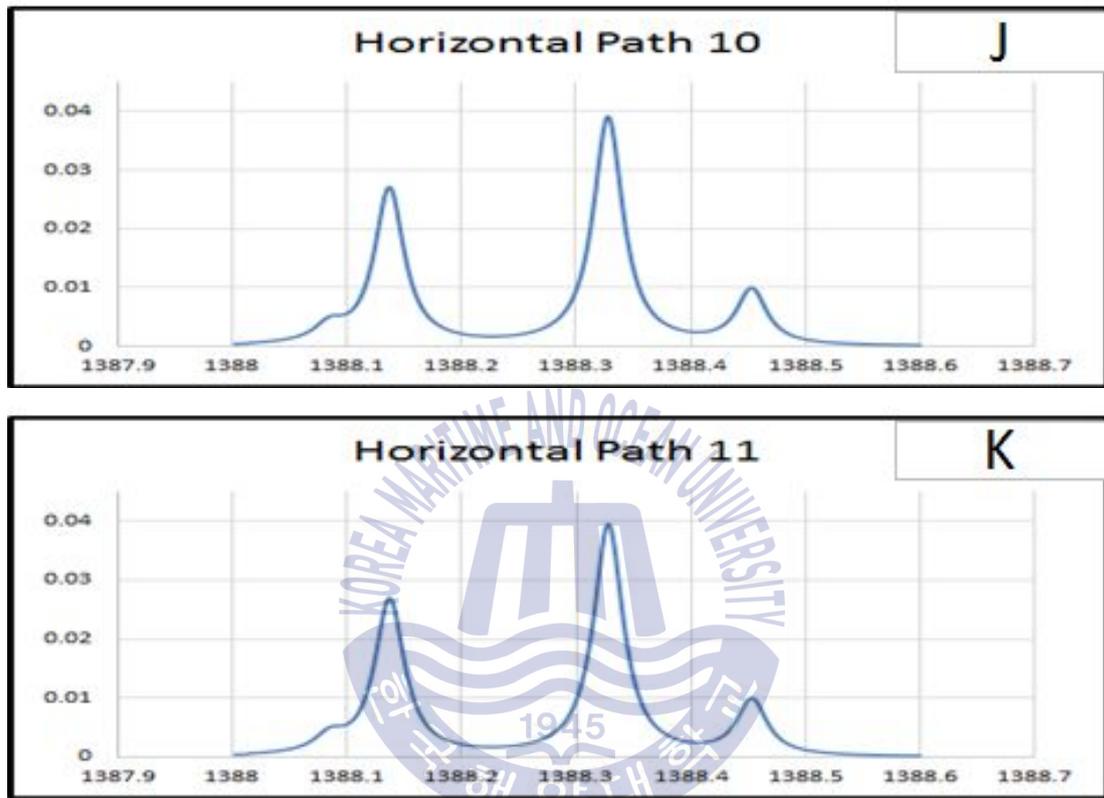


Fig. 3.4.4 The calculated absorption graphs of H₂O spectrum at 1338.0~1338.5nm from phantom temperature at the horizontal 10~ 11 paths

Fig. 3.4에서의 A~K 그래프는 가상의 연소장을 투과하는 가로축 레이저의 파장별 흡수량 데이터를 1~11 path의 순서대로 보여준다.

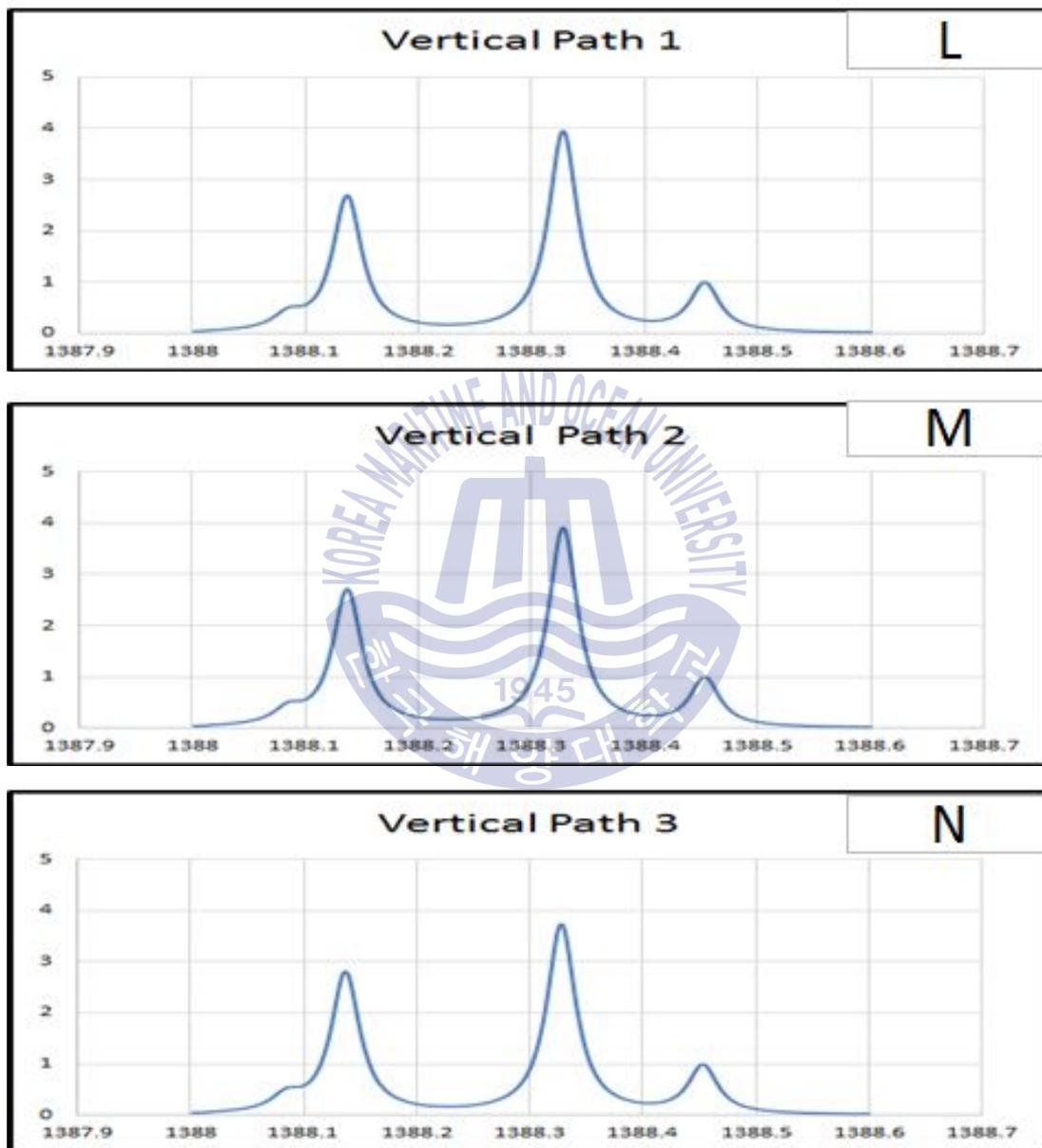


Fig. 3.5.1 The calculated absorption graphs of H_2O spectrum at 1338.0~1338.5nm from phantom temperature at the vertical 1~3 paths

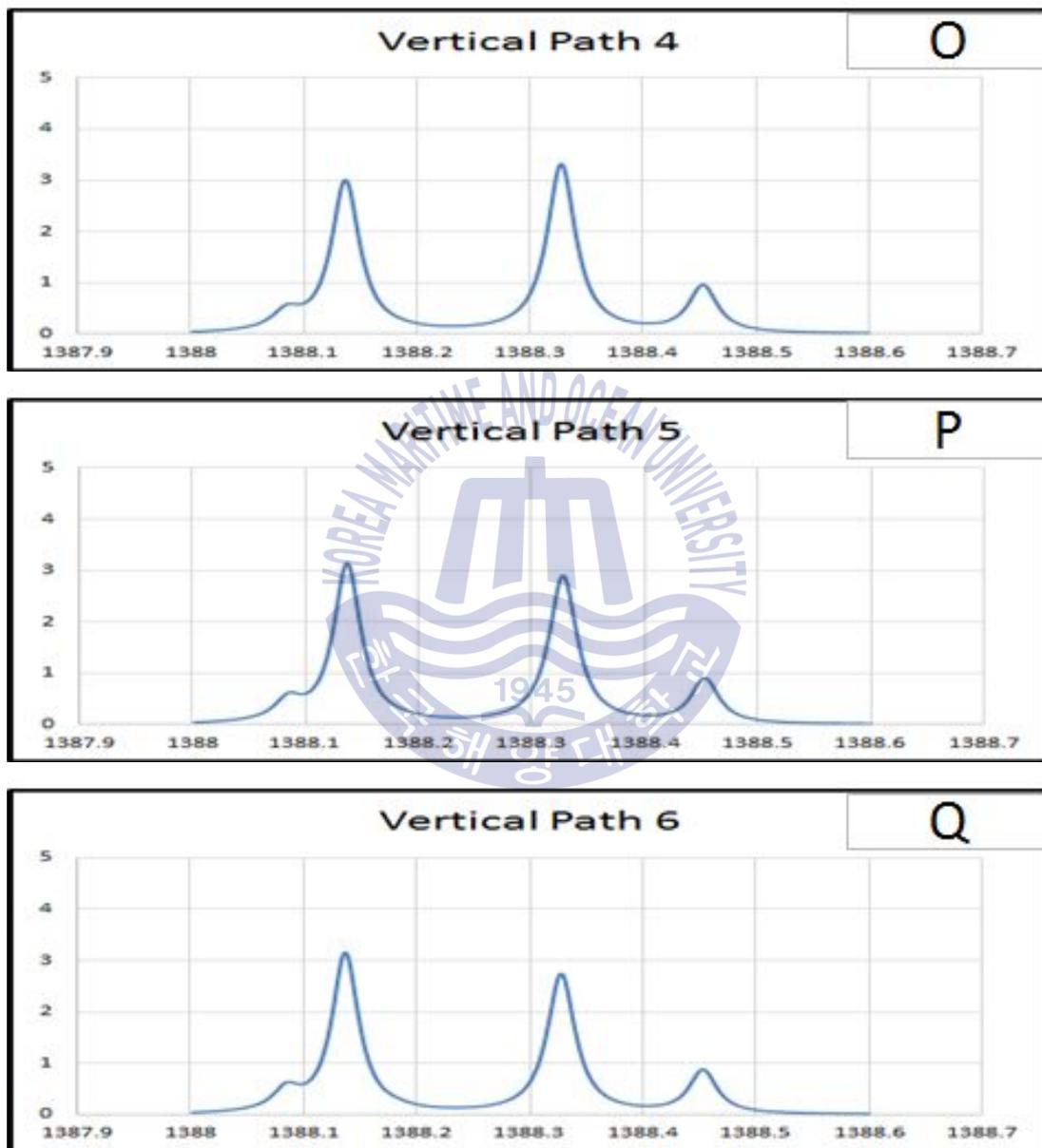


Fig. 3.5.2 The calculated absorption graphs of H₂O spectrum at 1338.0~1338.5nm from phantom temperature at the vertical 4~6 paths

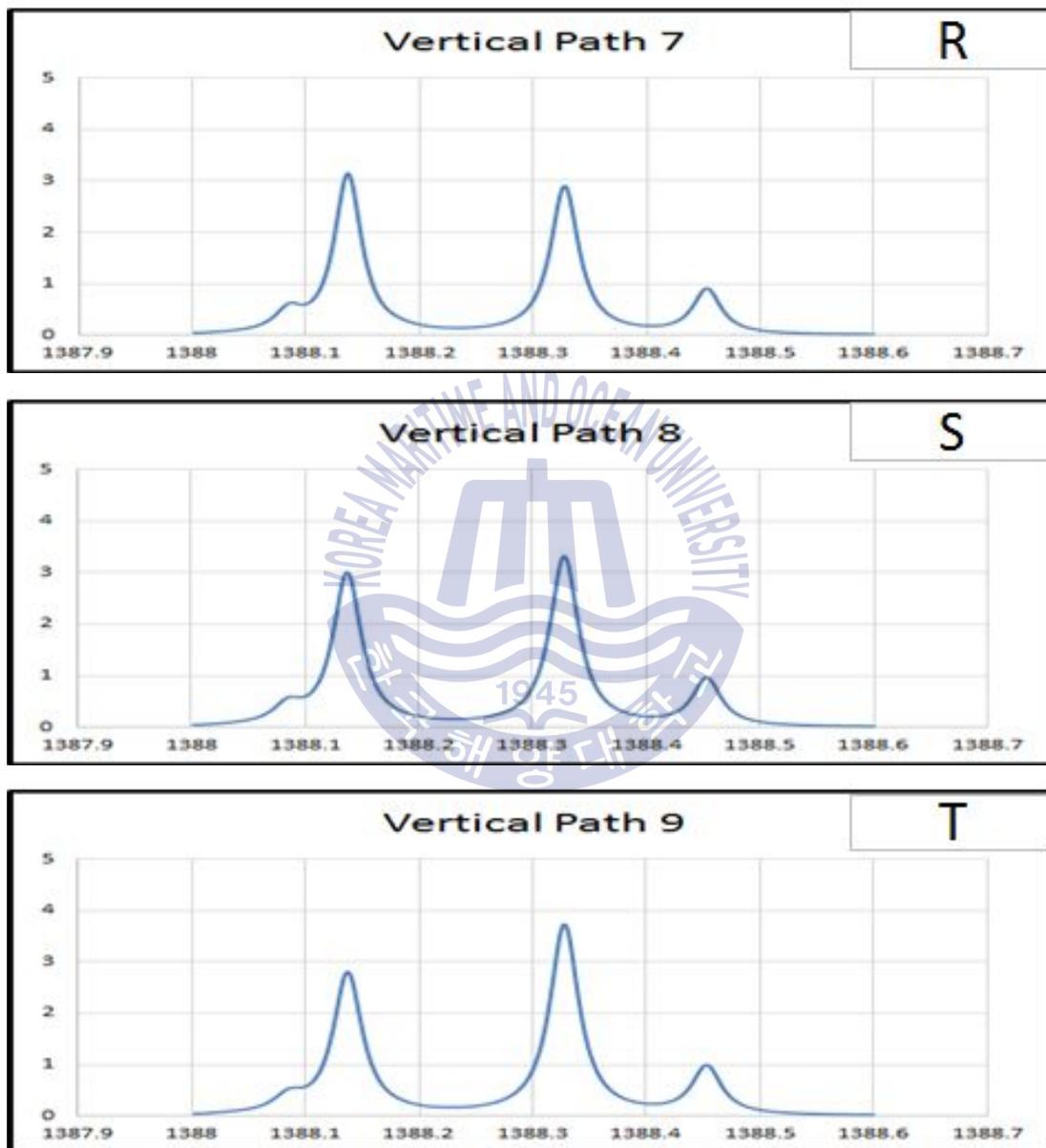


Fig. 3.5.3 The calculated absorption graphs of H₂O spectrum at 1338.0~1338.5nm from phantom temperature at the vertical 7~9 paths

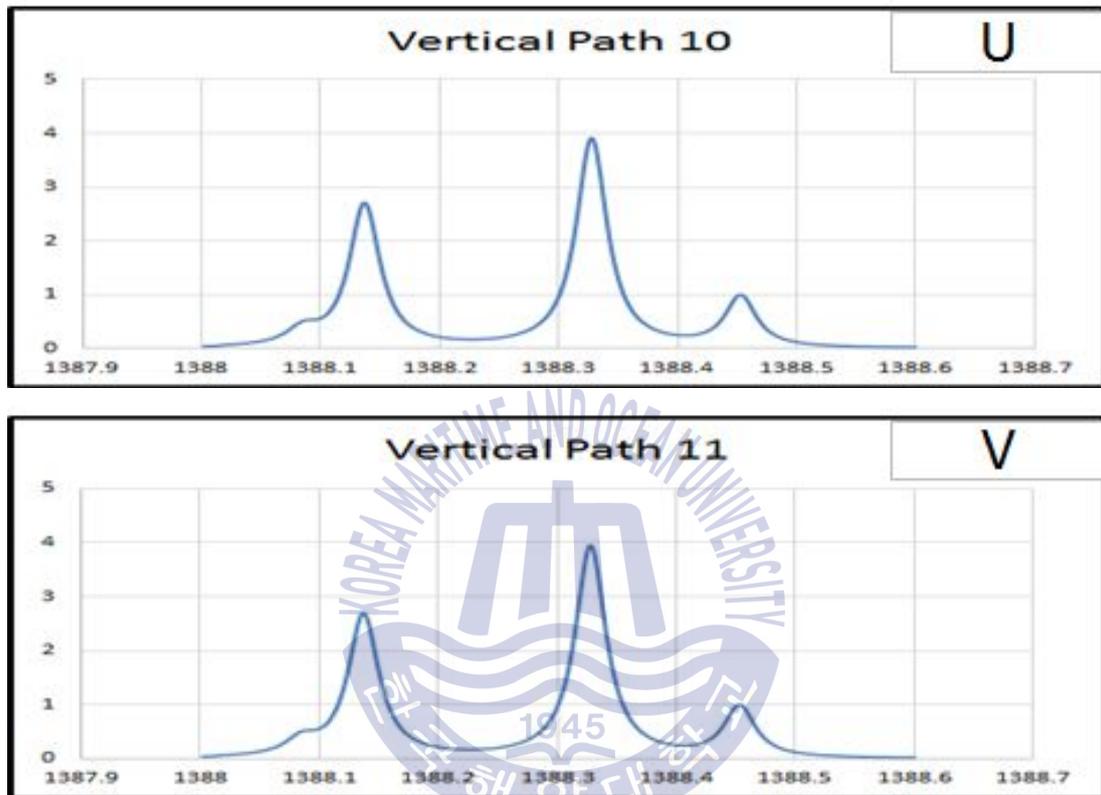


Fig. 3.5.4 The calculated absorption graphs of H₂O spectrum at 1338.0~1338.5nm from phantom temperature at the vertical 10~ 11 paths

또한 Fig. 3.5에서도 L~V 그래프는 가상의 연소장을 투과하는 세로축 레이저의 파장별 흡수량 데이터를 1~11 path의 순서대로 보여준다.

3.4 NCC를 이용한 흡수량 계산

먼저 레퍼런스 $f(x,y)$ 와 템플릿 $t(x,y)$ 에 대한 정의를 각각 Phantom 그래프, HITRAN 그래프로 둔다. 각각의 함수에 대하여 \bar{f} 와 \bar{t} 를 뺀 뒤에 σ_f 와 σ_t 를 나눠주고 n 으로 전체를 나눠주면 벡터의 길이는 1로 정규화된다. \bar{f} 와 σ_f 는 각각 f 의 평균과 표준편차고, \bar{t} 와 σ_t 는 t 의 평균과 표준편차이며 n 은 픽셀수다. 정규화 과정을 거친 두 함수를 F 와 T 라 할 때, 두 함수간의 내적을 통해 관계를 밝힌다. 아래의 식 (2.24) 정규화된 상호상관법(Normalized Cross Correlation)을 이용하여 두 그래프간의 상관량(유사도)을 계산한다.

$$\frac{1}{n} \sum_{x,y} \frac{(f(x,y) - \bar{f}) \cdot (t(x,y) - \bar{t})}{\sigma_f \sigma_t} \quad (2.24)$$

Fig. 3.6에서는 실제 코드에서 템플릿 매칭법(Template Matching Method)을 수행중임을 나타낸다. 빨강색으로 표현된 함수는 Phantom 흡수강도, 초록색으로 표현된 함수는 HITRAN 흡수강도이며 각각의 흡수량 그래프가 일치 하도록 정규화된 상호상관법에 의해 찾은 후, 매칭된 값을 기준으로 흡수량을 구한다.

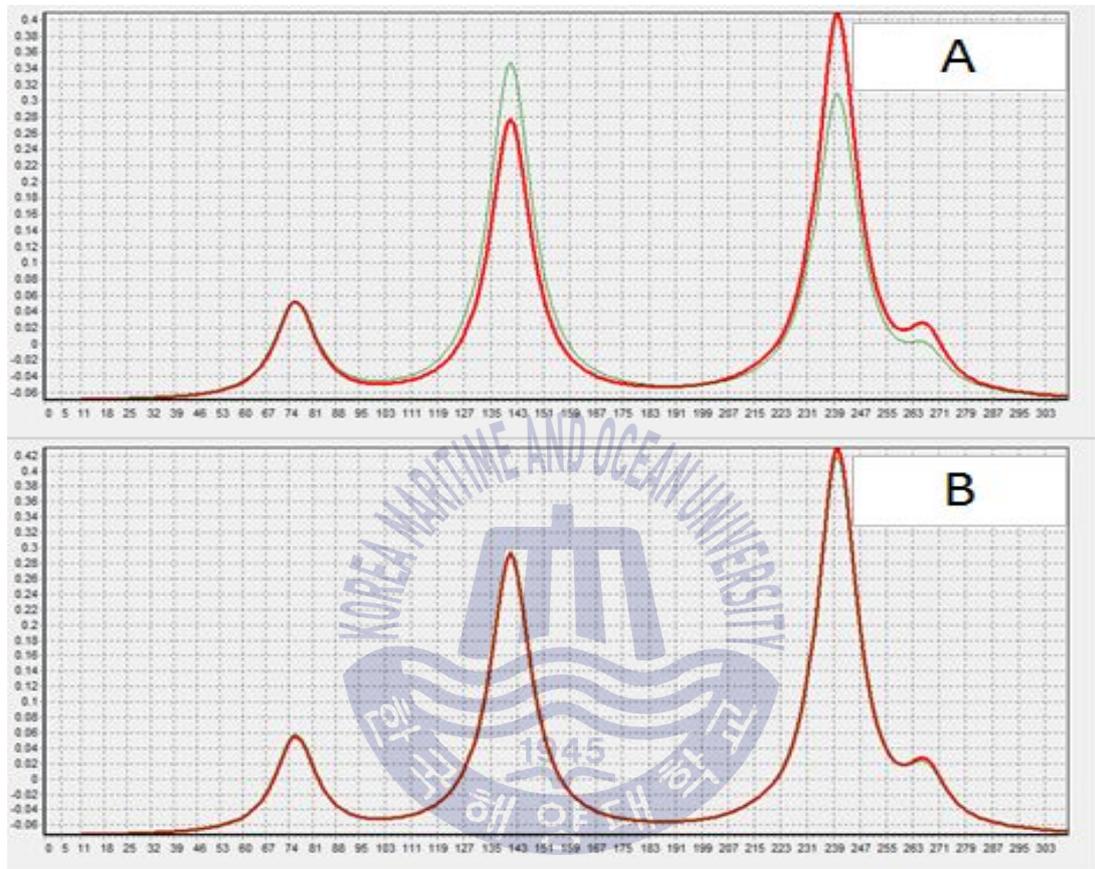


Fig. 3.6 Calculation process of the template matching method
(Normalized Cross Correlation Method)

Fig. 3.6에서처럼 실제 계산 프로그램은 A와 같이 Phantom(빨간) 그래프가 HITRAN(초록) 그래프와 매칭되지 않을 경우, 또 다른 패턴을 가진 HITRAN 그래프와 다시 매칭을 시도하며 B와 같이 두 그래프가 매칭되었을 될 때까지 수행한다.

3.5 Mart법 적용 및 결과

계산된 흡수량 정보를 기반으로 온도장 농도장의 분석을 위하여 토모그래피 기법을 도용하였다. 본 연구에서는 토모그래피 재구성 해석 방법으로 편차를 곱셈 수정벡터로 하는 MART(multiplicative algebraic reconstruction technique)법을 사용하여 재건 계산을 하였다. 팬텀 흡수량과 계산된 흡수량의 편차가 최소가 되어 수렴할 때까지 반복적으로 계산하는 방법으로 식 (2.26)을 사용한다.

$$\alpha_j(i)^{(k+1)} = \alpha_i(i)^{(k)} \times \left[\frac{A_{j,\text{experiment}}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{i,\text{theory}} L_{ij}} \right]^{\beta L_{ij}} \quad (2.26)$$

β 값은 0~1 사이의 값을 가지는데, 본 논문에서는 Choi et al., (2014)의 연구의 결과로서 밝힌 최적화된 β 값으로 0.1을 이용한다. 가로레이저와 세로레이저 순번으로 계산을 실시하며, 새로운 흡수계수 $a(i)^{k+1}$ 값으로 갱신되면 다시 템플릿 매칭을 이용해 새로운 온도값과 농도값을 얻는다. 이와 같은 방법으로 계산된 흡수량에 팬텀데이터의 흡수량이 수렴할 때까지 반복 계산하여 에러가 최소일 때의 온도값과 농도값을 구한다. 아래의 Fig. 3.7은 반복 계산 과정의 흐름도를 나타낸다.

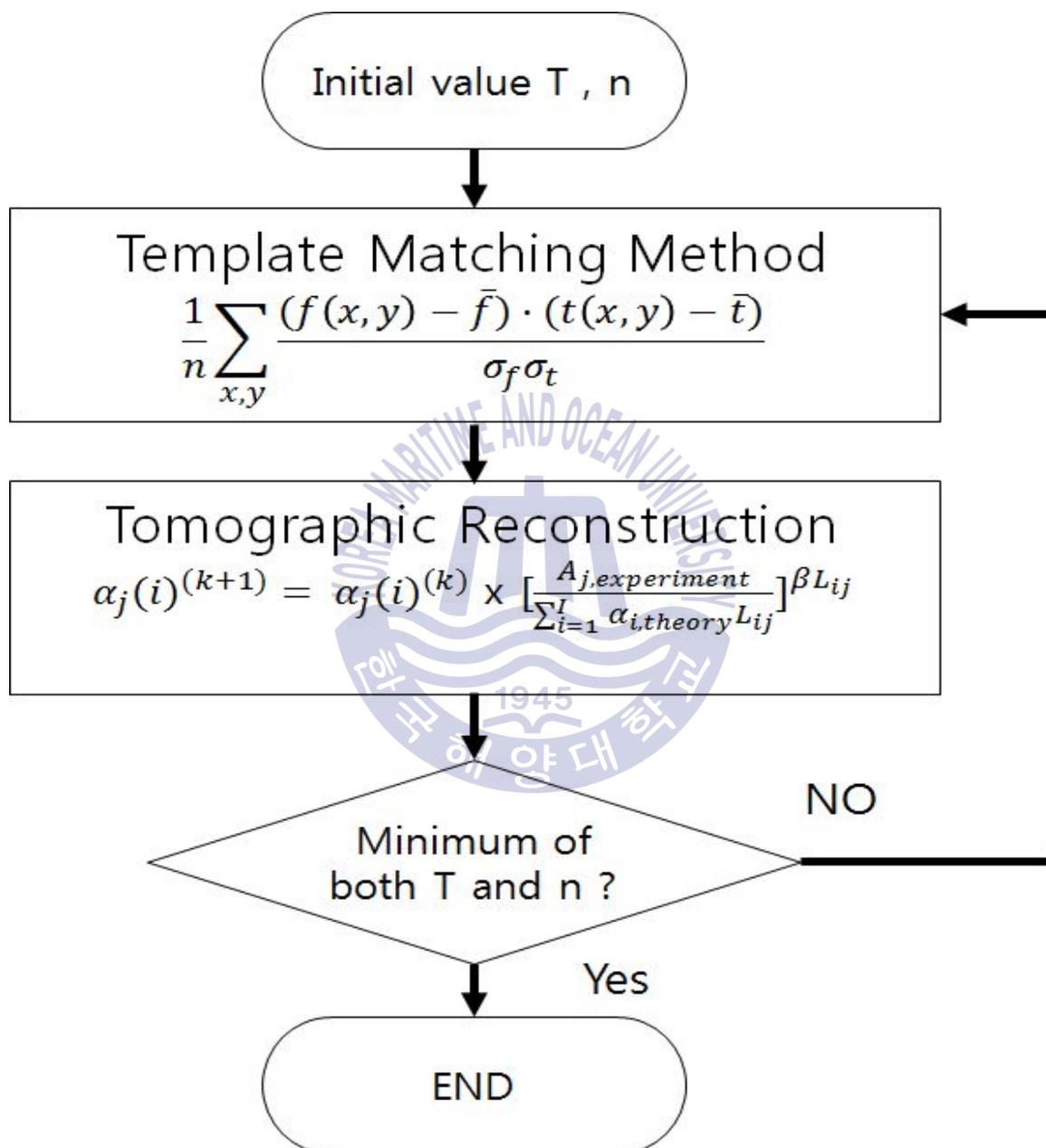


Fig. 3.7 Process of iteration about T, n

본 연구에서는 오차 값이 $1.0 \times E^{-20}$ 근처에 도달하도록 782회의 반복계산을 통해 수렴하였다.

최종적으로, 모든 과정을 수행한 결과를 Fig. 3.8에 나타내었다.

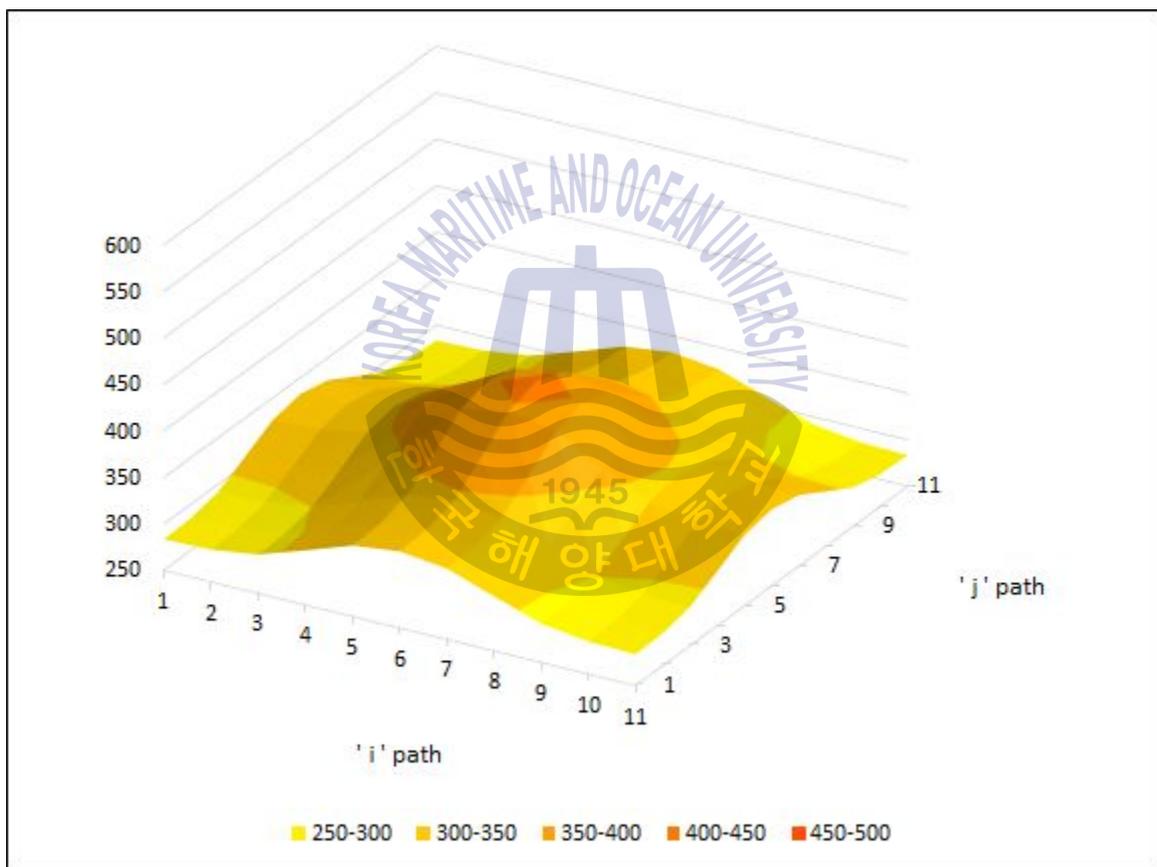


Fig. 3.8 Result of iterative calculation

반복계산 결과, 초기의 중심온도 600K을 찾아가지 못하였으며 또한 약 $\pm 195\text{K}$ 의 오차를 보인다. 초기의 주위온도 300K 또한 약 $\pm 25\text{K}$ 의 오차를 보인다.

그 원인에 대한 자료는 다음 Fig. 3.9과 같으며, 10K씩 상승 할 때마다, 저온부 250~300K는 그래프의 패턴 값이 두드러지게 나타나지만, 고온부 550~600K 그래프의 패턴 값은 미미한 변화를 보인다.



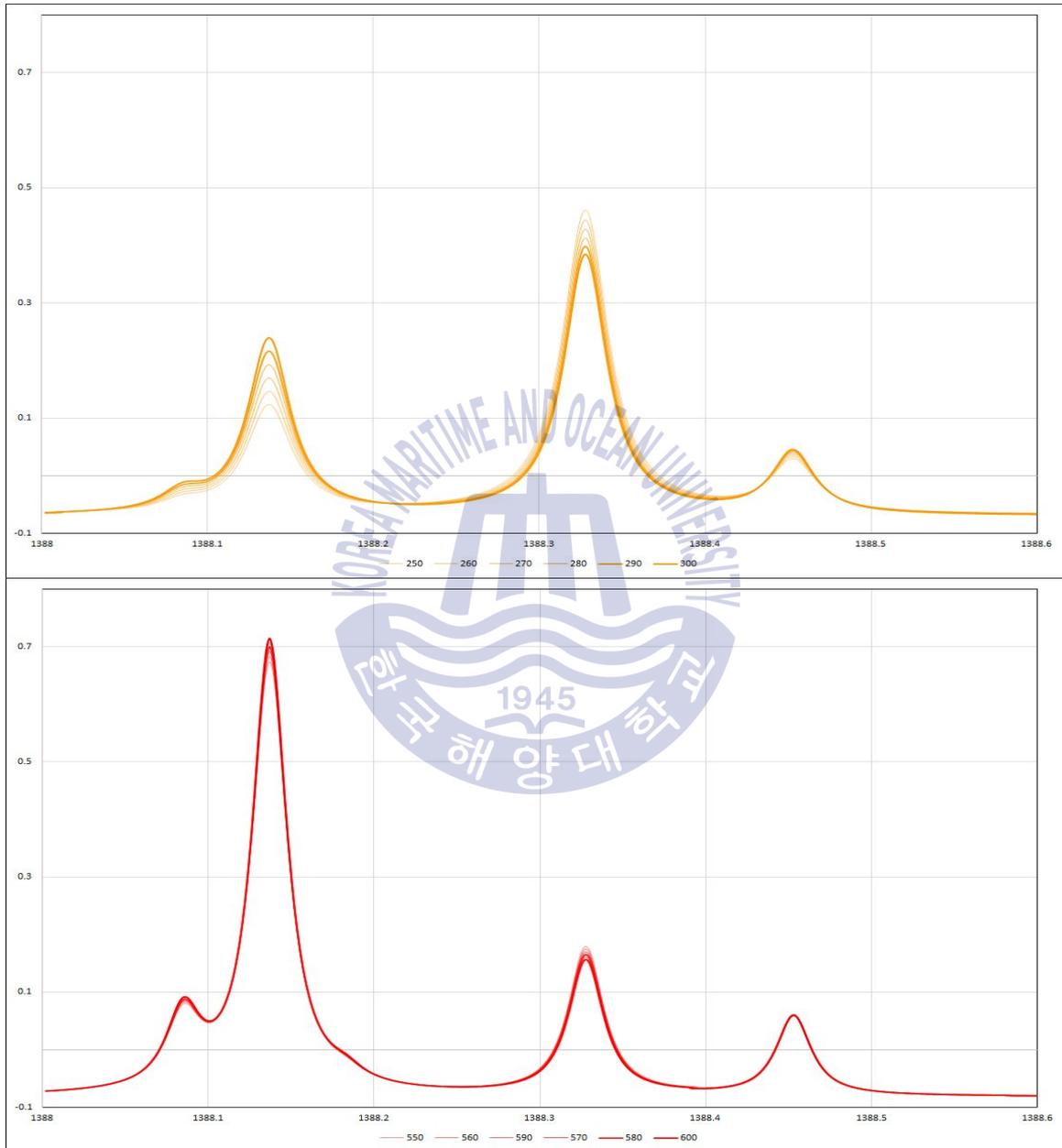


Fig. 3.9 Pattern changes at low temperature and high temperature

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 배기가스의 2차원 온도와 농도분포를 해석하기 위하여 기존의 TDLAS 기술의 고온부에서의 오차증대의 원인을 파악하기 위해, 새로운 온도추적 알고리즘을 적용하여 평가하였다. 실제 배기가스 연소 모델과 유사한 가상의 11 X 11 흡수선의 121개 셀의 온도와 농도분포를 만들었으며, 이론적인 TDLAS 계산법으로 22path H₂O 스펙트럼 흡수그래프를 모델링하였다. 이 흡수 그래프를 이용하여 토모그래피 해석 방법인 MART알고리즘의 적용하였고, 정규화된 상호상관법을 이용하여 Phantom 흡수량 그래프와 HITRAN 흡수량 그래프와의 템플릿 매칭을 통하여 온도를 추적하였다. 하지만, 실험 결과에서는 고온부(중심부)에서의 오차가 크게 나타났다. 그 원인으로써 고온부로 갈수록 그래프 패턴이 급격한 감소를 보였으며 정규화된 상호상관법을 기반으로 하는 템플릿 매칭법은 그래프 패턴을 추적하기에는 인식률이 크게 감소되어 충분치 않았다고 판단한다.

참고 문헌

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*, 2, pp.543-549.

Herman., Gabor T., 2009. Fundamentals of Computerized Tomography. *Springer*. 1nd

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*, 14(8), pp.1459-1468.

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.

김동혁, 신명철, 김세원, 2006. 다이오드 레이저를 이용한 연소 배기가스의 농도 측정 기법 개발. *대한기계학회 추계학술대회*, 6, pp.1453-1458

김동혁, 2007. *다이오드 레이저를 이용한 배기가스 측정에 관한 연구*. 석사학위논문. 서울:한양대학교.

전민규, 2014. *MART법을 이용한 토모그래피 온도장 농도장 정량화 기술 개선*. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.

