



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

MART법을 이용한 토모그래피 온도장 농도장 정량화
기술 개선

Improvements of Tomographic Quantification Technique for
Temperature and Concentration Fields using a Multiplicative
Algebraic Reconstruction Technique



2014년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과

전 민 규

本 論文을 全敏奎의 工學碩士 學位論文으로 認准함.



2014 년 1 월 3 일

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract	1
제1장 서론	2
1.1 연구배경 및 목적	2
1.2 연구의 구성	5
제2장 온도장, 농도장 측정법의 이론적 배경	6
2.1 온도장, 농도장 측정법의 원리	6
2.2 선 강도(Line-strengths)	10
2.3 선형함수(Lineshape function)	13
2.4 Tomographical Reonstrucion Method(ART & MART method)	19
제3장 H ₂ O 수증기의 온도장, 농도장 가상 측정방법 구축 및 성능평가	22
3.1 H ₂ O 수증기의 온도장, 농도장 측정방법	22
3.2 온도장, 농도장 ART법 결과	30
3.3 온도장, 농도장 MART법 결과	45
제4장 결론 및 고찰	58
참고문헌	59

Improvements of Tomographic Quantification Technique for Temperature and Concentration Fields using a Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique

by Min Gyu Jeon

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

Abstract

Each gas has its own unique spectrum lines. The intensity of the light passing through gases decreases following the Beer-Lambert law. This enables us to predict the density of the gases as well as its temperature. Recent advent of the tunable lasers enabled us to measure simultaneous temperature and concentration fields of the gases. In this study, a numerical prediction method in which the temperature and concentration fields of the H₂O vapor gas are calculated is proposed. ART (Algebraic Reconstruction Technique) method and MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) method were tested for the prediction. The data of the Harvard HITRAN table in which the thermo-dynamical properties and the light spectrum of the H₂O are listed were used for the numerical simulation. The reconstructed temperature and concentration fields were compared with the original HITRAN data, through which the constructed method is validated. It was verified that the results obtained by MART method showed relatively better agreements with those of original data.

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

국제해양오염방지협약(MARPOL, marine pollution)에 의거하여 2013년 1월 1일부터 새롭게 건조되는 모든 선박에는 에너지효율관리계획서(SEEMP, ship efficiency management plan)와 검사기관에서 공인한 국제에너지효율증서(IEE, international energy efficiency)를 비치해야만 항해를 할 수 있다. 기존의 선박 또한 정기 검사 시에 반드시 SEEMP를 비치해야만 항해가 가능하게 되었다. 이는 선박으로부터 배출되는 대기오염이 자동차에서 배출되는 수준보다 심각한 수준임을 말하며, 더 큰 제약조건이 따른다는 것을 시사한다. 따라서 우리는 선박 배기가스의 오염도를 정밀하게 측정할 수 있는 수단이 필요하고 국내외에서 발행하는 규제를 따라야 한다.

세계 각국은 환경규제를 벗어나기 위해 선박배출 유해가스를 줄이기 위한 노력의 일환으로서, NO_x배출을 줄이는 선택 촉매 저감장치, 배기가스 일부를 흡기로 되돌림으로써 NO_x를 저감하는 배기가스 재순환장치, 배기가스 열에너지를 전기에너지로 전환시켜 재활용하는 폐열회수장치 등을 속속 개발하고 있다.

본 연구와 일부 유사한 대표적 국내연구 성과로서 H. J. Cha(2004)가 있으나, 이 연구는 1점 표본점에 대한 이산화탄소의 농도를 측정한 사례이다. 마찬가지로 동일한 방법으로 D. H. Kim(2006)가 있다. 이 연구 역시 1점에서의 표본추출의 데이터를 이용하여 가스농도만을 측정하는 사례이다. 한편, 디지털 스펙클토폴로그래피법(digital speckle tomography)을 이용하여 이산화탄소 유동장의 속도와 밀도를 동시에 측정한 사례로서 성균관대 연구그룹의 H. S. Ko(2005)가 있다. 이들 연구는 이산화탄소 가스통에서 배출되는 유동장을 측정한 사례인 관계로, 미지의 가스종이 배출되었을 때의 성분검출이 어려운 한계를 가진다. 또한, 본 연구와 유사한 외국의 사례인 M. P. Arroyo(1993), X. Zhou(2003)가

배기가스에 포함된 수증기 성분을 분석하기 위하여 가변파장 다이오드레이저를 사용하여, 수증기의 흡수스펙트럼 특성을 이용한 농도 및 온도 동시측정기술을 개발하였다. 그러나 이들 그룹의 성과 역시 1점의 표본추출에 의거한 것이므로 본 연구에서 목표로 하는 가스배출량 산정기술과 거리가 있다.

본 연구와 가장 유사한 성과로서 일본 도쿠시마대학의 Deguchi 교수 연구그룹은 가변파장 다이오드레이저의 2차원적 배열을 이용하여 최근에 가스의 온도와 농도분포를 동시에 측정하는 기술을 완성하여 발표(Y. Deguchi(2012))한바 있다. 이들의 기술은 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법을 이용한 반복계산을 수행하였으나 토모그래피 기법 중 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법에 비해 정확성과 계산시간 단축에 효율이 높은 MART(Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)법을 적용하지 않았다.

그럼으로 본 연구는 가상측정값에 대한 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법과 MART(Multiplicative Algebraic

Reconstruction Technique)법의 성능평가를 하고자 한다. 또한, 배출되는 가스량을 정확하게 측정할 수 있는 기술은 아직 미개발 상태이다. 현재의 배출량 산정방식은 배기구에 설치된 1점에 대한 센서로부터 표본추출에 의거하고 있어서, 가스 농도분포가 불균일한 상태로 배출되는 선박의 경우에는 이 방식으로 는 실제 배출량을 산정할 수가 없다.

따라서 본 연구는 가스원자의 농도에 따라 흡수되는 빛은 지수 함수적으로 감소한다는 Beer-Lambert 법칙에 기반을 둔 가스배출량 산정이 가능한 기술을 개발하는 것을 연구의 목표로 삼고 있다.

이를 달성하기 위하여 가스원자 종류별로 빛의 흡수스펙트럼을 달리하는 반도체 레이저광을 조사(照査)하여 흡수스펙트럼을 측정함으로써 가스 농도측정이 가능하도록 하고, 흡수선 강도(line intensity)가 온도에 따라 달라지는 특성을 이용한 가변파장 다이오드레이저(tunable diode laser)기반의 온도측정기술을 구축하고자 한다.

배출되는 가스별 배출량 측정을 위하여 두 가지 기술을 단계별로 완성하고자

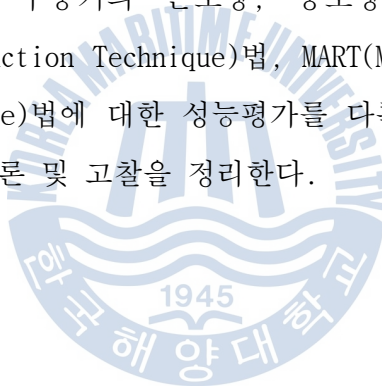
한다. 먼저, 여러 개의 가변파장 다이오드레이저 배열(array)로부터 얻어지는 동시각의 광신호를 토모그래피법(CT, computed tomography)으로 재구성함으로써 단면상 그리고 동시각의 농도분포와 온도분포 측정이 가능한 기술을 완성하고자 한다.



1.2 연구의 구성

본 논문은 온도장·농도장 동시측정 기술을 구축하고, 복원알고리즘인 ART (Algebraic Reconstruction Technique)법, MART(Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)법을 이용한 성능평가를 연구의 목적으로 삼고 있다. 이를 위한 논문의 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적에 대하여 소개하고, 제2장에서는 온도장·농도장 동시측정에 대한 이론적 배경을 설명한다. 또한 CT(Computerized Tomography), ART(Algebraic Reconstruction Technique)법 및 MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)법에 대한 설명을 포함한다. 제3장에서는 H₂O 수증기의 온도장, 농도장 가상측정방법 구축 및 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법, MART(Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)법에 대한 성능평가를 다룬다. 마지막으로 제4장에서는 가상결과에 대한 결론 및 고찰을 정리한다.



제2장 온도장, 농도장 측정법의 이론적 배경

2.1 온도장, 농도장 측정법의 원리

본 연구는 가스원자의 농도에 따라 흡수되는 빛은 지수함수적으로 감소함을 이용한 Beer-Lambert 법칙에 기반을 둔 가스 농도 측정법이다. 이에 앞서 분광학에 대한 기초적인 이해가 필요하다. 특히 레이저 분광학은 레이저의 특성(직진성, 좁은 선폭, 파장가변성, 결맞음, 고출력 등)을 이용하여 원자, 분자 혹은 거대분자들의 에너지 준위를 측정하고, 구조를 분석하며, 화학적 및 물리적 반응을 연구하는데 활용되고 있는 첨단 학문이다. 레이저 분광학 분야는 매우 광범위 하지만 이를 크게 나뉘보면 분광신호를 발생시키는 방법에 따라 흡수 분광학, 형광분광학, 이온화 분광학, 발광 분광학, 라만 분광학 등으로 구별된다. 최근 들어서는 펨토초 레이저를 이용한 펨토초 분광학도 매우 활발하게 연구개발되고 있다.

원자나 분자들은 많은 에너지 준위를 갖고 있다. 대부분의 원자나 분자들은 가장 낮은 에너지 준위에 주로 분포되어 있다. 분광학 연구는 이 바닥상태로부터 다른 에너지의 들뜬상태로 원자나 분자들을 전이시키는 과정에서 발생하는 정보를 측정하여, 이를 토대로 분자나 원자들의 내부구조 및 에너지 준위 등에 대한 정보를 얻는 것을 주된 목표로 한다. Fig. 2.1에 여러 가지 레이저 분광학에 대한 공정을 나타낸다. Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 흡수(absorption), 형광(fluorescence), 그리고 이온화 과정이 에너지 준위들을 거치면서 실행되기 때문에 해당 에너지 준위에 대한 정보를 분광신호 측정을 통하여 알 수 있다. 레이저 분광학을 이용하여 원자 및 분자의 특성을 연구하기 위해서는 레이저의 파장을 변화시킬 수 있는 고분해능 파장가변 레이저가 필수적으로 필요하다. 분광연구에 사용되는 대표적인 파장가변 레이저에는 색소 레이저, OPO(Optical Parametric Oscillator), Alexandrite 레이저, 다이오드 레이저,

quantum cascade laser 등이 있다. 그 중 흡수 분광학은 Fig. 2.2에서 나타낸 바와 같이 대상 시료에 레이저를 조사시켜서 조사시키기 전과 후의 레이저 에너지를 파장에 따라서 측정하여 시료의 에너지 준위를 측정하고 이를 통하여 원자나 분자들의 특성 및 구조를 연구하는 것이다. 광측정용 센서로는 PMT(photomultiplier tube) 혹은 광다이오드(photodiode)등을 사용한다.

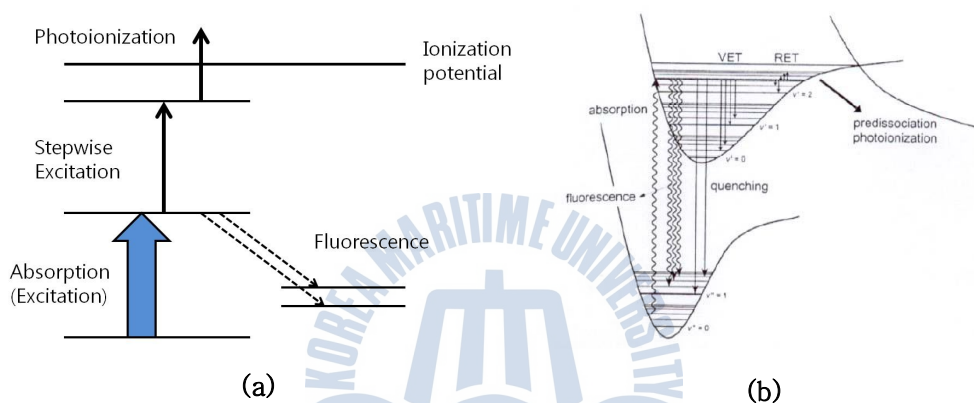


Figure. 2.1. Spectroscopic various steps of atoms(a) and molecules(b)

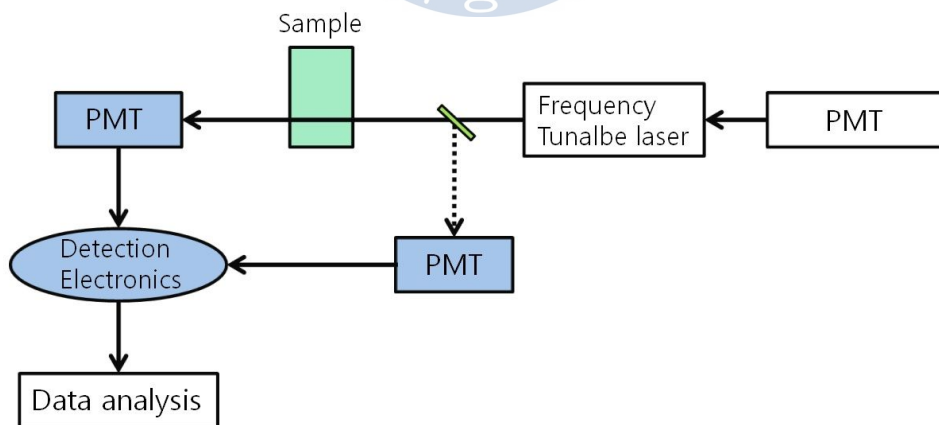


Figure. 2.2. Experimental setup of absorption spectroscopy

또한, 다이오드 레이저 흡수 분광 기술의 원리는 임의의 특정 가스 분자들은 특정 고유 흡수 파장을 가지고 있다는 데 주의한다. 고유 흡수 파장과 같은 파장의 레이저 빔을 측정 대상에 투과 시킬 경우 가스 분자들은 흡수를 일으켜 투과된 레이저 빔의 강도에 변화가 나타난다. 이러한 입력 신호와 투과 신호의 강도의 비인 흡광도(Absorbance)를 얻게 되고, 이러한 흡수 신호의 분석을 통하여 가스 농도 측정이 가능해진다. 흡수 분광학의 기본 이론은 Beer-Lambert 법칙으로 설명 가능하다. Beer-Lambert 법칙은 Fig. 2.3과 같이 균일한 가스 매질에 레이저 빔을 통과할 때 투과된 신호와 레이저 방출 신호의 강도비로 나타낸다. Beer-Lambert 방정식은 식 2.1과 같으며, α_λ 는 가스의 농도와 온도의 함수로 나타내는 흡수계수(Absorption coefficient)이다. 또한 식 2.2와 같이 농도와 온도의 함수로 나타낸다.

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

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

$I_o(\lambda)$: Incident light intensity

$I_t(\lambda)$: Transmitted light intensity

α_λ : Absorbance

n_i : Number of density of species 'i'

P : Pressure

L : Length of light path

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

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

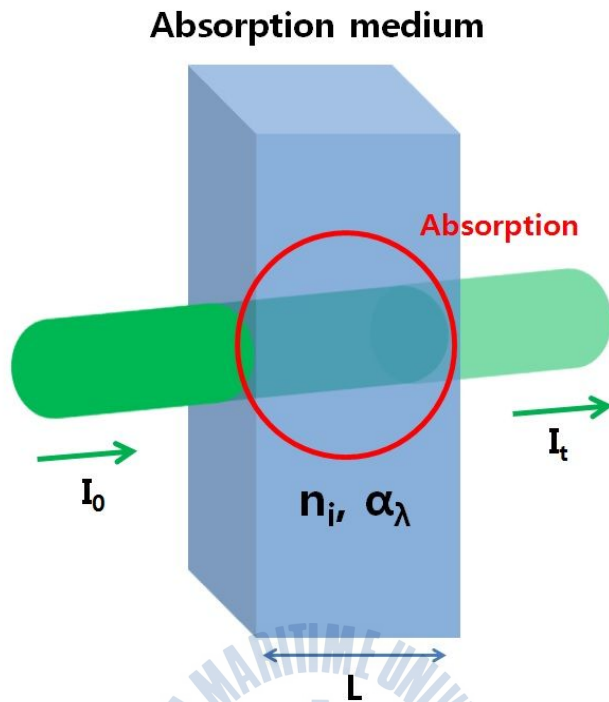
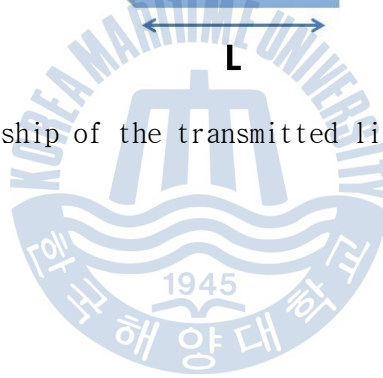


Figure. 2.3. Relationship of the transmitted light and incident light



2.2 선 강도(Line-strengths)

흡수 천이의 세기(strength)가 분광학적 선강도(Spectra line-strength)로 표현하기 위해서 같은 종류의 분자들은 낮은 양자 에너지 상태(lower quantum state)에서 빛 에너지의 흡수에 의해 높은 에너지 상태(high quantum state)로 되면서 분자들의 운동에 의한 분광학적 천이(spectral transition)가 일어남을 알아야 한다. 또한 이러한 낮은 양자에너지 상태에서의 분자들의 선 강도는 통계학적인 Boltzmann 분포에 의해 설명될 수 있다. Fig. 2.4는 이산화탄소 분자의 R과 P 브랜치(branch)에 대한 초기 3개의 회전운동에 의한 천이를 예로 보여준다.

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 $S^*[cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}]$ 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 2.3에서 n 은 수 밀도(Number density)[$molecules/cc$]이고, P 는 압력[atm]을 나타낸다.

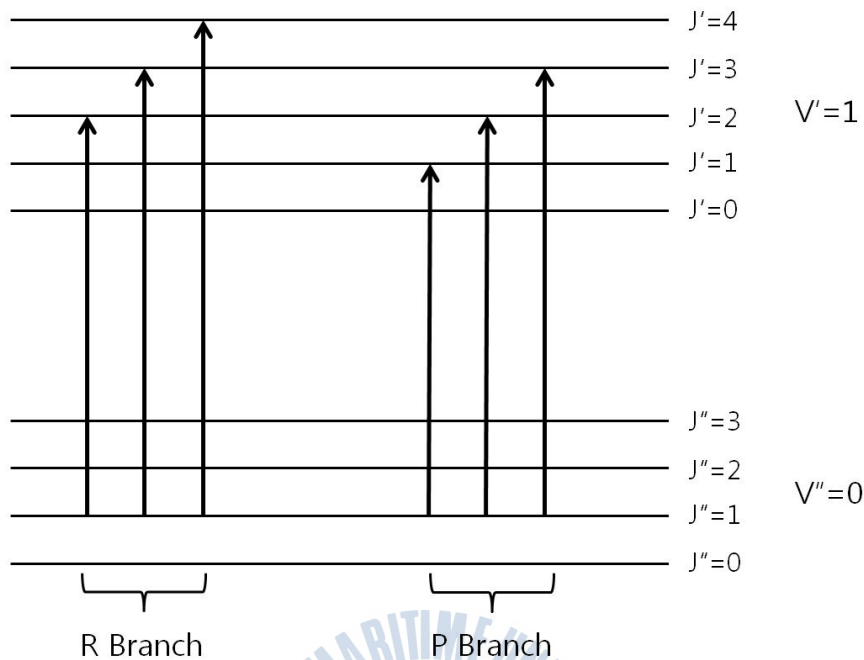


Figure. 2.4. Energy diagram of the first three rotational transitions in the R and P branch for a typical molecule

식 2.3에서 이상 가스 상태방정식을 적용하고, 압력의 단위를 $[dynes/cm^2]$ 에서 $[atm]$ 으로 전환하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

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

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

식 2.4에서 볼츠만 상수 값을 대입하여 정리하면 다음과 같이 간소화 된다.

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

식 2.5에서 상온 (room-temperature : 296K)을 고려하면 ($T = 296K$) 다음과 같은 식 2.6을 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 T 에서의 특정 천이 i 에 대한 선강도 $S_i(T)$ 는 분자의 기준 온도(T_0)에서의 선강도 (S_i), 흡수하는 분자의 부분 함수 (Q), 천이 주파수 (V_0) 그리고 천이의 저 준위 에너지 (E')에 의해 결정되어지며, 관계식은 다음과 같다.

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp \left[- \frac{hcE'}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times \left[1 - \exp \left(\frac{-hcV_{0,i}}{kT} \right) \right] \left[1 - \exp \left(\frac{-hcV_{0,i}}{kT_0} \right) \right]^{-1} \quad (2.7)$$

2.3 선형함수(Lineshape function)

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 전환되어져야만 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 연소배기가스 농도 측정을 고려되어야 할 사항이다.



2.3.1 Gaussian lineshape function

Gaussian 선형 함수는 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(Thomal motion)에 의해 발생하는 분자 속도에 따른 도플러 선형 함수(Doppler lineshape function)는 Fig. 2.5와 같이 전형적인 종 모양의 형태를 가진 Gaussian 곡선으로서 그려진다.

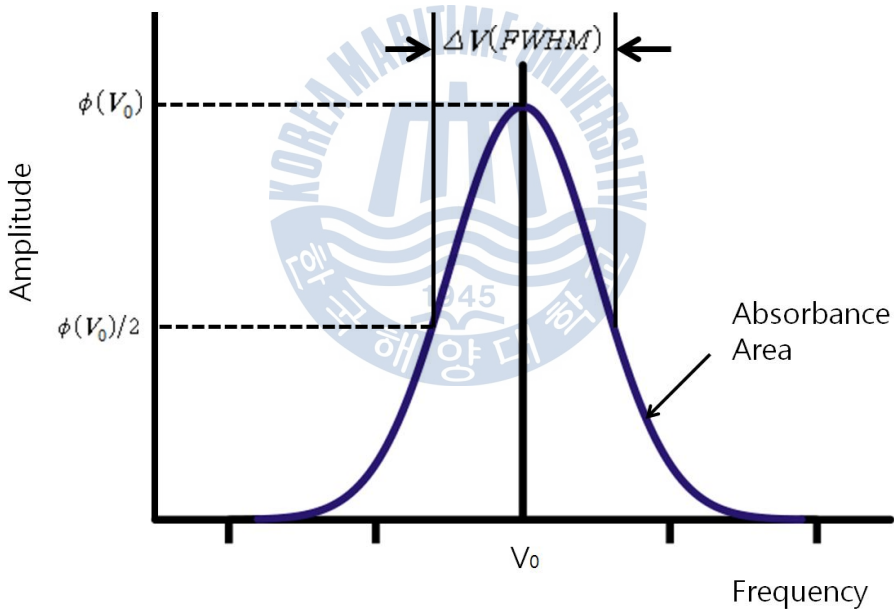


Figure. 2.5. Sample lineshape as a function of frequency

식 2.8에서 ΔV_D 는 도플러 선폭(Doppler width)이라 하며, 선형 함수의 FWHM(Full Width at Half Maximum)으로 나타낸다. 도플러 선폭(Doppler width)

은 식 2.9와 같이 계산되어 진다.

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

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

위의 식 2.9에서 $V_0 [cm^{-1}]$ 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 더욱더 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

가스 분자들로 인해 발생하는 흡수 신호는 지속적인 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 Lonenzian 선형 함수로서 표현 가능 하다.

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

식 2.11에서 $\Delta V_n [cm^{-1}]$ 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 인

해 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 2.12와 같이 Lorentzian profile에 의해 나타낼 수 있다.

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

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 2.13와 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 2.14로 표현된다.

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

식 2.14에서 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 2.15와 같다.

$$\Phi_c(V_0) = \frac{2}{\Delta V_c \pi} \quad (2.15)$$



2.4 Tomographical Reconstruction Method(ART & MART method)

3차원 공간에서 2차원 공간으로 투영하는 방법에는 Angular method와 Translation method가 있다. Angular method에는 matrix를 이용하는 방법으로 식 2.16과 도형의 길이 비를 이용한 pin-hole 모델법이 있다. Translation method는 카메라를 평행하게 배치하고 대상체를 촬영하는 일종의 기하학 모델을 이용한 투영법이다.

$$[4 \times 4] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x = \frac{x'}{z'} \\ y = \frac{y'}{z'} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Fig. 2.6은 Tomographic PTV 시스템을 나타낸다. 실제 3차원 공간에서의 광원으로부터 빛 밝기정보 $E(X_j, Y_j, Z_j)$ 를 가지는 입자들과 2차원의 카메라 CCD 센서에 맺힌 2차원의 빛 밝기정보 $I_{(x_i, y_i)}$ 와의 관계는 식 2.17로 나타낸다.

$$I_{(x_i, y_i)} = \sum_{j \in N_i} w_{ij} E(X_j, Y_j, Z_j) \quad (2.17)$$

w_{ij} 는 가중치로 복셀(voxel) 입자밝기가 픽셀(pixel)에 미치는 영향도를 의미하며, 상대적인 복셀의 크기와 복셀중심과 카메라 시선 사이의 거리에 영향을 받으며, $0 \leq w_{i,j} \leq 1$ 의 값을 가진다. Fig. 2.7은 2차원 영상으로부터 3차원 공간으로 투영관계를 이용한 토모그래픽 복원 모델을 나타낸다. 토모그래픽을 이용한 입자 재구성법은 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법과 MART(Multiply Algebraic Reconstruction Technique)법이 있으며, ART법은

입자의 밝기정보(계조치값)의 실제값과 계산된 값의 차를 이용하는 방법이며, 식 2.18로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{ART: } E(X_j, Y_j, Z_j)^{k+1} \\
 & = E(X_j, Y_j, Z_j)^k + \mu \left(\frac{I(x_i, y_i) - \sum_{j \in N_i} w_{i,j} E(X_j, Y_j, Z_j)^k}{\sum_{j \in N_i} w_{i,j}^2} \right)^{\mu w_{i,j}} w_{i,j} \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

μ 는 계산의 수렴속도를 높이기 위한 가중치이며, $0 \leq \mu \leq 2$ 사이의 값을 가진다. 하지만, 가중치를 곱함에도 불구하고 상대적으로 계산 값이 큰 경우 수렴속도가 늦다. MART법은 계조치값과 계산된 값의 비를 이용하며, ART법에 비해 신속하게 계산 결과를 얻을 수 있다. 식 2.19는 MART법의 계산식을 나타낸다.

$$\text{MART: } E(X_j, Y_j, Z_j) = E(X_j, Y_j, Z_j)^k \left(\frac{I(x_i, y_i)}{\sum_{j \in N_i} w_{i,j} E(X_j, Y_j, Z_j)^k} \right)^{\mu w_{i,j}} \quad (2.19)$$

μ 는 계산의 수렴속도를 높이기 위한 가중치로 $\mu \leq 1$ 의 값을 가진다. 본 연구는 토모그래픽 기술을 이용하여 측정대상으로부터 얻어진 신호를 재구성하고 ART법과 MART의 계산의 수렴속도 비교를 하고자 한다.

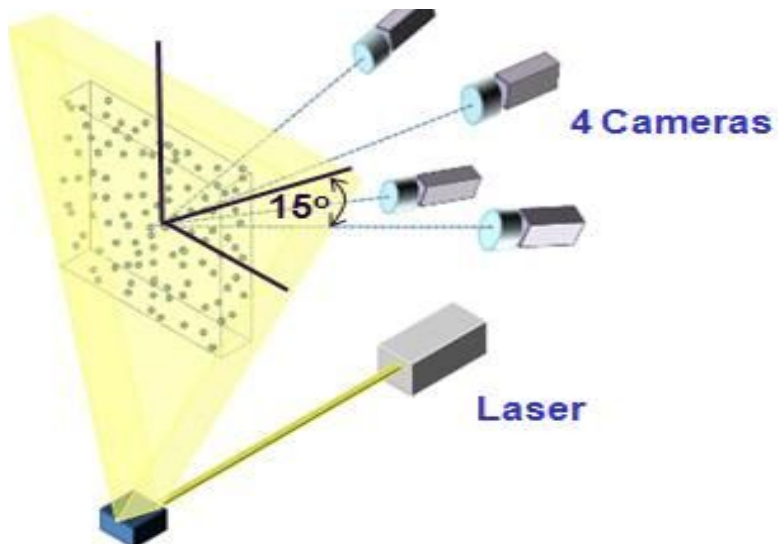


Figure. 2.6. Tomographic PTV system

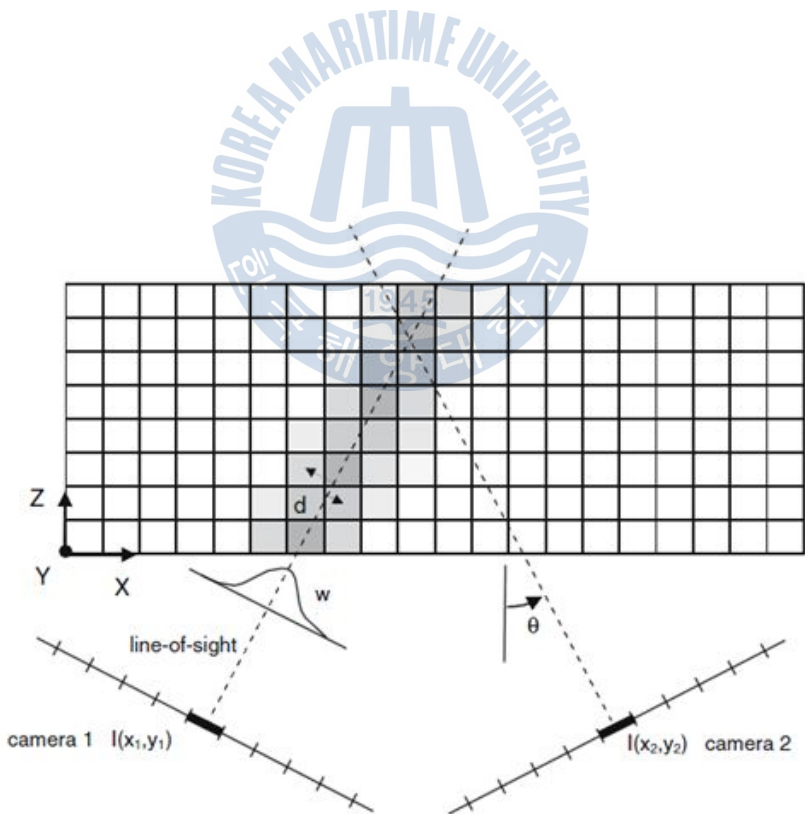


Figure. 2.7. Tomographical reconstruction method

제3장 H₂O 수증기의 온도장, 농도장 가상 측정방법 구축 및 성능평가

3.1 H₂O 수증기의 온도장, 농도장 측정방법

Fig. 3.1은 농도·온도 분포를 동시에 측정하기 위한 토모그래피 시스템의 구성도를 나타낸다. 측정가스 대상으로서 물수증기(H₂O)를 대상으로 한다. 가스 원자의 농도에 따라 흡수 스펙트럼의 특성이 달라지는 가변파장 다이오드레이저를 이용한다.

다이오드레이저 광원은 12개의 채널로 분할하기 위하여 광섬유분할기(fiber splitter)를 사용한다.

레이저 광원은 Fig. 3.2와 같이 12개 채널의 시준기(collimator)를 통하여 측정부에 조사(照査)된다. 이어서 검출부(detector)를 거쳐서 신호분석기(analyzer)로 가스를 통과한 흡수광의 신호가 전달된다.

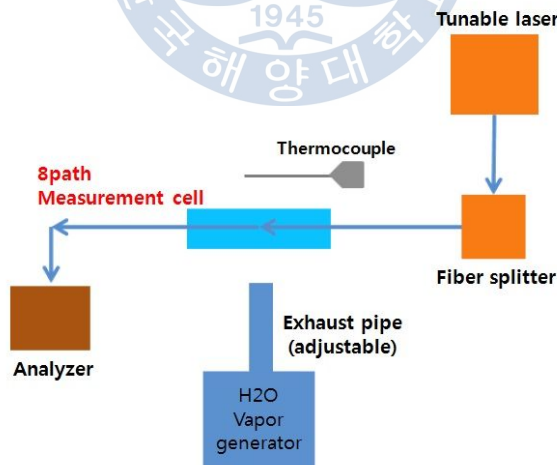


Figure. 3.1. Simultaneous measurement tomography system of concentration and temperature

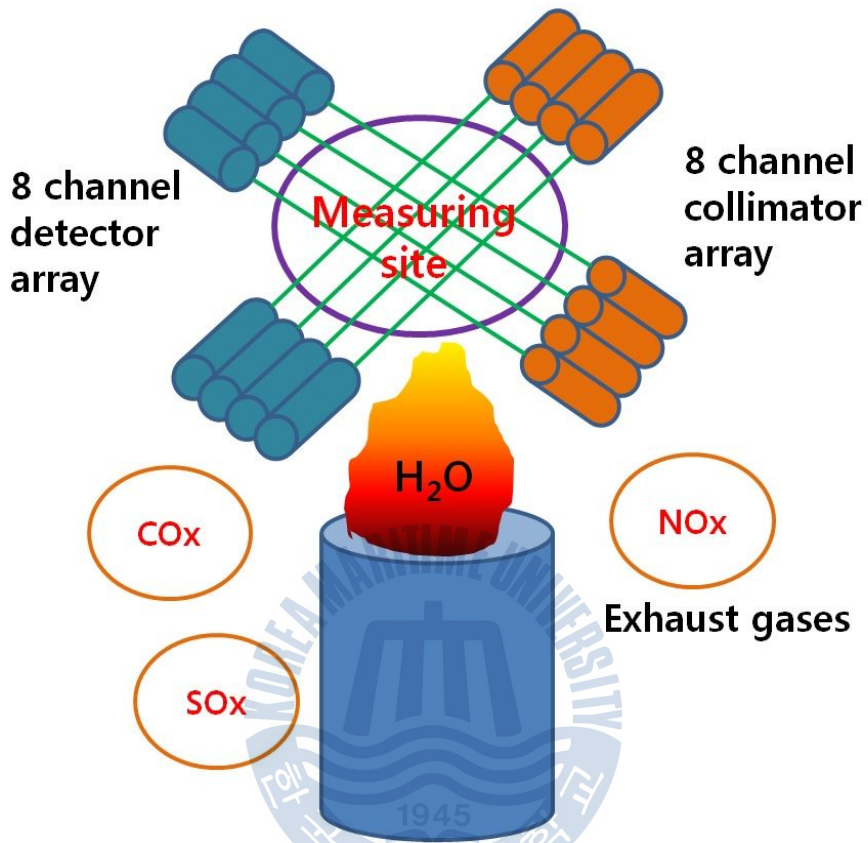


Figure. 3.2. H₂O concentration, simultaneous measurement of the temperature distribution

가스원자에 흡수되는 흡수광은 Beer-Lambert 법칙에 의하여 아래 식 3.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_t(\lambda)}{I_o(\lambda)} = \exp\{-\alpha_\lambda\} \quad (3.1)$$

여기서, α_λ 는 가스의 농도와 온도의 함수로 나타나는 흡수계수(absorption coefficient)이다. α_λ 는 다음 식 3.2와 같이 농도와 온도의 함수로 나타낸다.

$$\alpha_\lambda = \sum_i \left(n_i \cdot P \cdot L \sum_j S_{i,j}(T) G_{vi,j} \right) \quad (3.2)$$

여기서, n_i 는 가스의 수밀도, P는 압력, L은 투과되는 빛의 길이, $S_{i,j}(T)$ 는 앞에서 구축한 HITRAN(high-resolution transmission molecular absorption, Stanford대에서 제공하고 있음) 데이터베이스로부터 구해지는 선강도(line strength)이며 온도의 함수이다. $G_{vi,j}$ 는 광원의 형상 함수이다. 한편, 식 3.2는 다음 식 3.3과 같이 빛의 흡수량으로 나타낼 수 있다.

$$A_{v1,j} = \sum_{i=1}^I [P \cdot X \cdot S(T)]_{v1,i} L_{ij} \quad (3.3)$$

이어서, 다음 식 3.4를 이용하여 식 3.2의 흡수계수를 Fig. 3.3의 격자상에 대하여 구할 수 있게 된다.

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{v1,j}(i)^{(k)} + \mu \frac{A_{v1,j} - \sum_{i=1}^I \alpha_{v1,j}(i)^{(k)} \cdot L_{ij}}{\sum_{i=1}^I L_{ij}^2} \quad (3.4)$$

이와 같이 각 격자상의 초기 농도와 온도분포, $n(i,j)$ 와 $T(i,j)$ 가 구해지면 Fig. 3.5와 같이 실험장치의 검출부(detector)에서 측정된 흡수광 신호(Fig. 3.4는 H₂O수증기의 경우 흡수광의 스펙트럼사례를 나타낸다.)가 계산값과 거의 동일한 값을 가질 때까지 반복계산을 수행한다. 즉, $(A_{v1,j})_{theory}$ 인 이론에 의한 흡수량(HITRAN 데이터로부터 계산됨)과 실험에 의하여 얻어진 흡수량이 같아질 때까지 반복계산을 수행하면 최종적인 농도와 온도분포, $n(i,j)$ 와 $T(i,j)$ 를 구할 수 있게 된다.

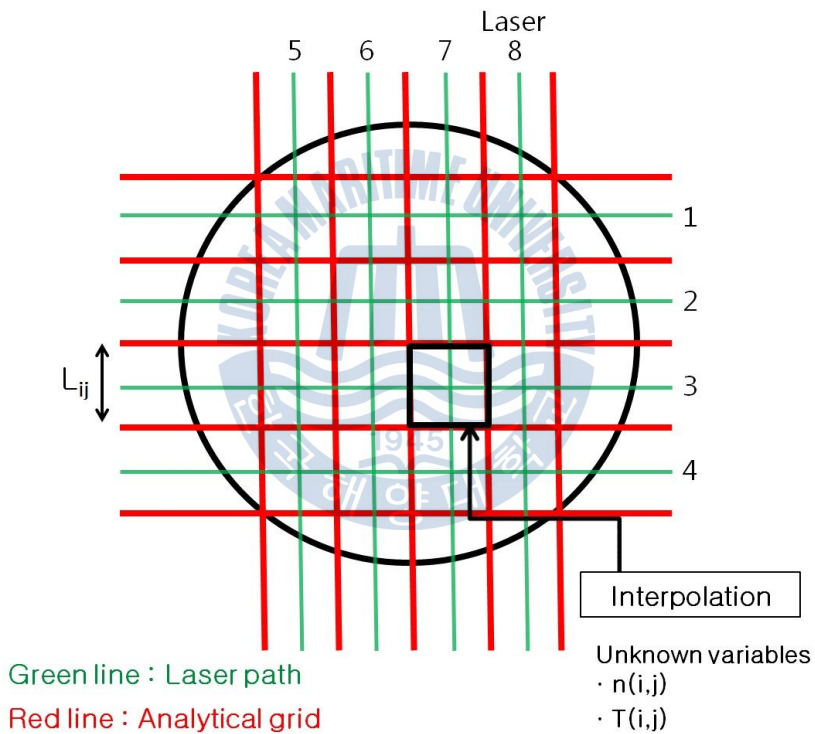


Figure. 3.3. The grating is to determine the concentration and the temperature distribution

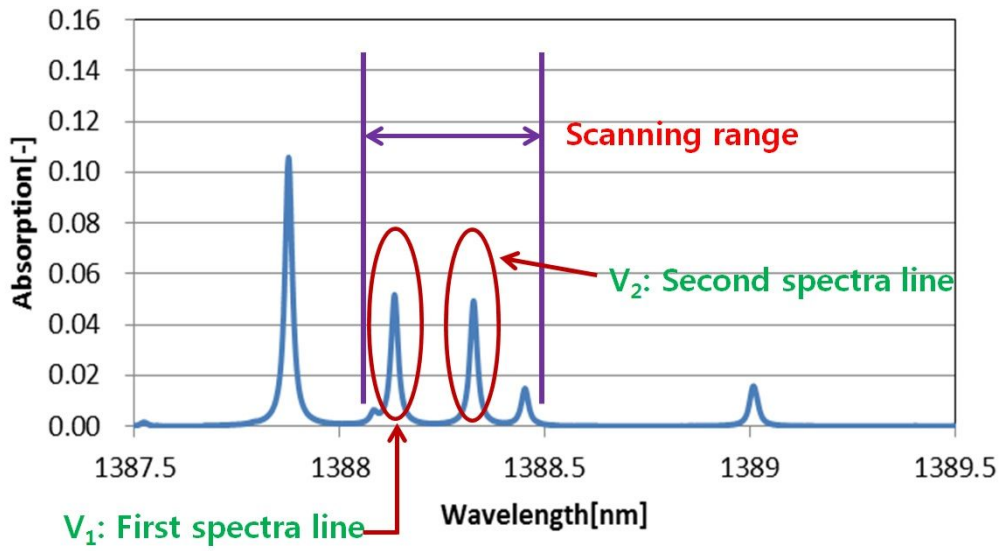


Figure. 3.4. Absorption spectral distribution of water vapor



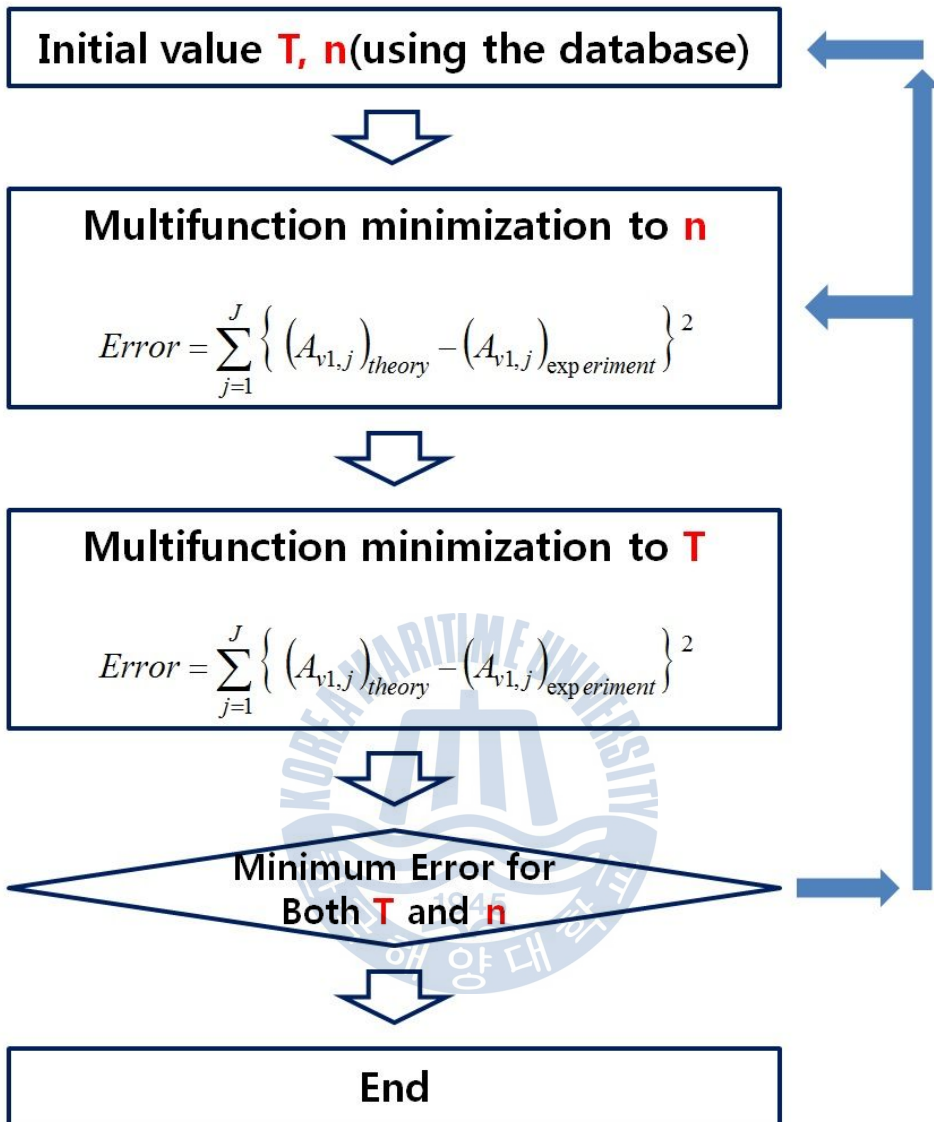


Figure. 3.5. Process of iterative computation of tomography

한편, 식 3.3의 $(A_{v1,j})_{\text{experiment}}$ 는 다음의 식 3.5로 각 격자상의 $n(i,j)$ 와 $T(i,j)$ 의 함수관계로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (A_{v1,j})_{\text{experiment}} &= \sum_{i=1}^I \alpha_{v1,j}(i) \cdot L_{ij} \\
 &= \alpha_{v1,j}(1) \cdot L_{1j} + \alpha_{v1,j}(2) \cdot L_{2j} + \alpha_{v1,j}(3) \cdot L_{3j} + \dots \\
 \alpha_{v1,j}(i) &= n(i,j) \cdot S_{i,j}\{T(i,j), v1\} \cdot G_{v1,j} \cdot P \\
 &= n(1,j) \cdot S_{1,j}\{T(1,j), v1\} \cdot G_{v1,j} \cdot P \\
 &\quad + n(2,j) \cdot S_{2,j}\{T(2,j), v1\} \cdot G_{v1,j} \cdot P \\
 &\quad + n(3,j) \cdot S_{3,j}\{T(3,j), v1\} \cdot G_{v1,j} \cdot P + \dots
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

각 $n(i,j)$ 와 $T(i,j)$ 이 수렴할 때까지 $(A_{v1,j})_{\text{theory}}$ 값과 $(A_{v1,j})_{\text{experiment}}$ 값과의 차이가 최소조건을 고려하여 반복계산을 수행한다. 계산을 수행하기 전에 실험으로부터 구해진 Fig. 3.6의 흡수량은 신호에 노이즈가 많이 있는 관계로 3차 또는 6차의 다항식으로 근사화 한 다음 이론에 의하여 구해진 흡수량이 근사값에 도달할 때까지 반복계산을 수행한다.

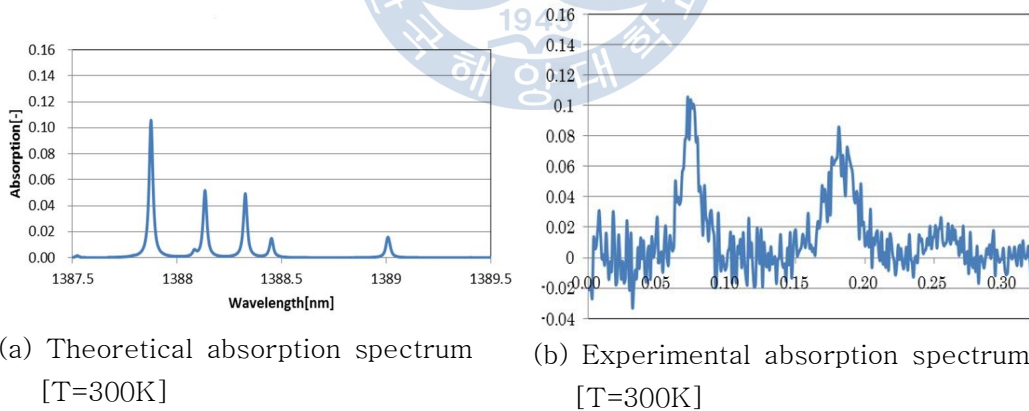


Figure. 3.6. The case of water vapor, the absorption spectrum of the theory and experiment

한편, HITRAN 데이터베이스를 이용하여 선강도를 계산할 때에는 다음 식 3.6을 적용한다.

$$S_i(T) = S_i(T_0) \cdot \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right) \cdot \exp\left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \cdot \left(\frac{1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-hcv_{0,i}}{kT_0}\right)}\right) \quad (3.6)$$

h 는 플랑크 상수, $h = 6.6256 \cdot 10^{-27} [\text{erg} \cdot \text{s}]$

k 는 볼츠만 상수, $k = 1.38054 \cdot 10^{-16} [\text{erg}/\text{K}]$

c 는 빛속도, $c = 3.0 \cdot 10^{10} [\text{cm}/\text{s}]$

v_0 는 천이선강도 $[\text{cm}^{-1}]$ 파수(파장의 역수)

E'' 는 하위준위에너지 레벨 $[\text{cm}^{-1}]$

이 식에서 분배함수 $Q(T)$ 는 다음 식 3.7로부터 구해진다.

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (3.7)$$

윗 식에서 온도(T)는 다음 식 3.8로부터 구할 수 있다.

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_1'' - E_2'')}{R - \ln \frac{S(T_0, v_2)}{S(T_0, v_1)} + \frac{hc}{k} \left(\frac{E_1'' - E_2''}{T_0}\right)} \quad (3.8)$$

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

3.2 온도장, 농도장 ART법 결과

가스 원자에 흡수되는 흡수광은 Beer-Lambert 법칙(식 2.2)에 의해 표현되며, 흡수계수를 구하기 위해서 기존에 방식은 ART법을 응용한, 식 3.4와 같이 표현한다. 이를 가상으로 구성하기 위해 Fig. 3.7과 같이 레이저 path에 대한 노드점에 가상의 온도값과 농도값을 부여하고, Fig. 3.8과 같이 각 노드점에 대하여 좌표값을 레이저 순번에 따라 부여한다.

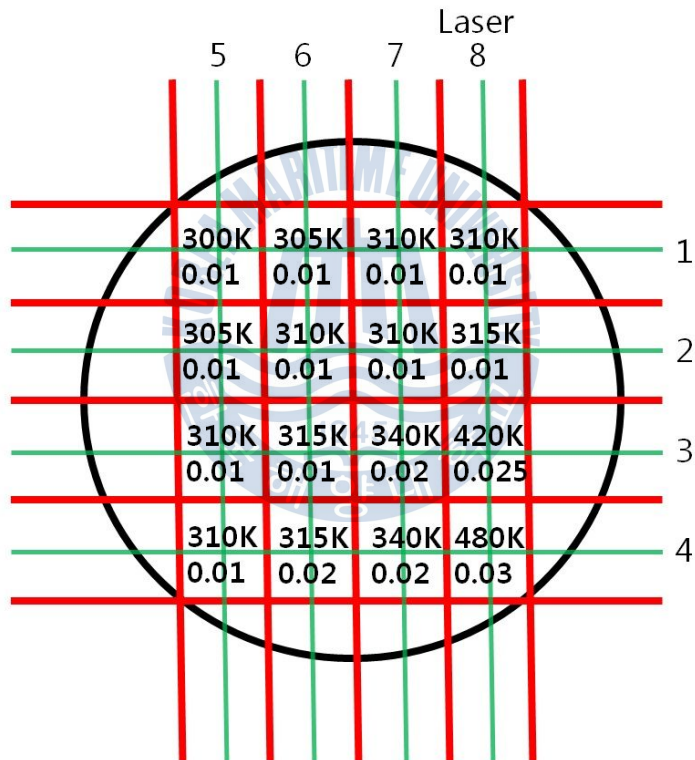


Figure. 3.7. Intial value setting

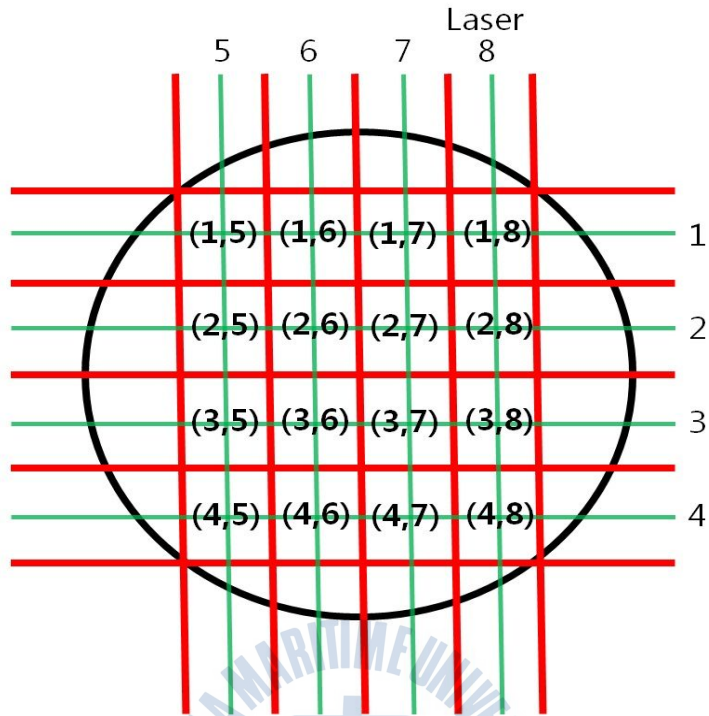


Figure. 3.8. Laser grid name

또한, Fig. 3.4와 같이 레이저의 흡수광 파장이 나타남으로 가상으로 표 3.1과 같이 수증기의 흡수광 스펙트럼의 영역을 설정한다.

Table. 3.1 Select three spectrum lines to calculate CT

V1	V2	V3
1388.136nm	1388.324nm	1388.452nm

표 3.2에서 기준온도(T_0) 296K 값에서 v_1 , v_2 파장에 대한 선강도(S)와 하위 에너지 레벨(E'')를 사용하며, 실험에 의한 강도비(R)을 사용하여 식 3.9에 적용하여 새로운 온도(T)를 구한다. 또한, 분배함수 $Q(T)$ 를 표 3.3을 이용하여 식 3.10으로 구하고 기준온도(T_0)와 새로운 온도(T)에 대한 정보를 이용하며,

레이저 순번에 대한 선강도(s)는 식 3.11에 의해 구한다. i번 레이저 선상에서 j번째에 있는 교차점에서의 흡수량(A : absorption)은 여전히 농도 n값은 미정 상태이나, 임의로 0.01또는 그 주변의 값으로 설정하여 식 3.12와 같이 구한다. 여기서 P는 대기압 1atm이며, 형상함수(G)는 대체로 1의 값을 사용한다.

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_1'' - E_2'')}{R - \ln \frac{S(T_0, v_2)}{S(T_0, v_1)} + \frac{hc}{k} \left(\frac{E_1'' - E_2''}{T_0} \right)} \quad (3.9)$$

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (3.10)$$

$$S_i(T) = S_i(T_0) \cdot \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \cdot \left(\frac{T_0}{T} \right) \cdot \exp \left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \cdot \left(\frac{1 - \exp\left(-\frac{hcv_{0,i}}{kT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{hcv_{0,i}}{kT_0}\right)} \right) \quad (3.11)$$

$$\alpha_{v1,j}(i) = n(i,j) \cdot S_{i,j}\{T(i,j), v1\} \cdot G_{v1,j} \cdot P \quad (3.12)$$

또한 지금까지의 결과로부터 식 3.13과 같이 흡수량($A_{v1,j}$)을 구하며, 식 3.14를 이용하여 ART법에 의한 새로운 흡수계수를 구한다. 여기서, 실험에서 구한 강도비(R)값과 현재의 임의로 계산된 이론상의 값($v1, v2$ 과장의 강도비(R))을 비교하여 농도(n)과 선강도(S)를 변경한다.

$$A_{v1,j} = \sum_{i=1}^I \alpha_{v1,j}(i) \cdot L_{ij} \quad (3.13)$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{v1,j}(i)^{(k)} + \mu \frac{\sum_{i=1}^I \alpha_{v1,j}(i) \cdot L_{ij} - \sum_{i=1}^I \alpha_{v1,j}(i)^{(k)} \cdot L_{ij}}{\sum_{i=1}^I L_{ij}^2} \quad (3.14)$$

따라서, 이를 계산하기 위해 v1과장일 경우 $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ 를 아래 표 3.5과 같이 레이저 path별 좌표값에 따라 표현한다. v2과장일 경우는 표 3.6와 같이 표현하며, v3과장일 경우는 표 3.7와 같이 나타낸다.

또한 ART법에 의한 수증기의 농도장, 온도장 가상측정 방법은 Fig. 3.9와 같다. 식3.9에서 선강도(S)와 에너지레벨 E_i 값은 표 3.2에서의 표준온도 296K에서의 값을 사용하며, 스탠포드 대학의 HITRAN Database에서 제공한다.



Table. 3.3 Coefficients of the polynomial expression for the partition function of H₂O

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}

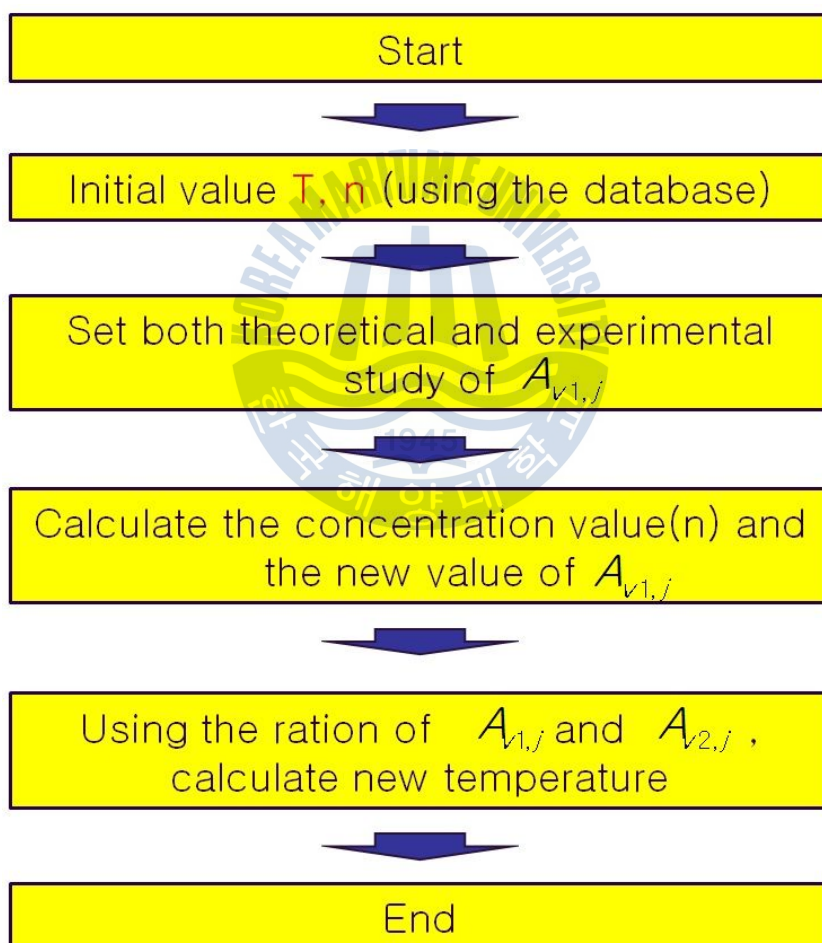


Figure. 3.9. Process of iterative virtual computation of tomography

Table. 3.5 Calculation of $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ using v1

V1 : 1388.136nm

Laser 1

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (1,5), (1,6), (1,7) and (1,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) * L = 0.004173545$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,6) * L = 0.004288252$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,7) * L = 0.004399924$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,8) * L = 0.004399924 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 2

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (2,5), (2,6), (2,7) and (2,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,5) * L = 0.004286838$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,6) * L = 0.00439851$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,7) * L = 0.00439851$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,8) * L = 0.004507303 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 3

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (3,5), (3,6), (3,7) and (3,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,5) * L = 0.004351611$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,6) * L = 0.004460404$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,7) * L = 0.00999938$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,8) * L = 0.015075473 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 4

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (4,5), (4,6), (4,7) and (4,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,5) * L = 0.00432432$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,6) * L = 0.008988277$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,7) * L = 0.00997209$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,8) * L = 0.019010855 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 5

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (5,1), (5,2), (5,3) and (5,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,1) * L = 0.004175121$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,2) * L = 0.004289828$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,3) * L = 0.0044015$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,4) * L = 0.0044015 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 6

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (6,1), (6,2), (6,3) and (6,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,1) * L = 0.004272334$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,2) * L = 0.004384006$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,3) * L = 0.0044928$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,4) * L = 0.009047962 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 7

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (7,1), (7,2), (7,3) and (7,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,1) * L = 0.004367751$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,2) * L = 0.004367751$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,3) * L = 0.010015521$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,4) * L = 0.010015521 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 8

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (8,1), (8,2), (8,3) and (8,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,1) * L = 0.004335541$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,2) * L = 0.00444334$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,3) * L = 0.015059403$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,4) * L = 0.015059403 \quad L=0.8\text{cm}$$

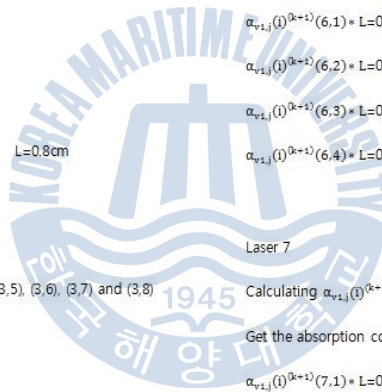


Table. 3.6 Calculation of $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ using $v2$

V2 : 1388.324nm

Laser 1

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (1,5), (1,6), (1,7) and (1,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) * L = 0.00387016$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,6) * L = 0.003902088$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,7) * L = 0.003674613$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,8) * L = 0.003674613 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 2

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (2,5), (2,6), (2,7) and (2,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,5) * L = 0.003902208$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,6) * L = 0.003674733$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,7) * L = 0.003674733$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,8) * L = 0.003711784 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 3

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (3,5), (3,6), (3,7) and (3,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,5) * L = 0.003662035$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,6) * L = 0.003699085$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,7) * L = 0.006597167$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,8) * L = 0.005513402 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 4

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (4,5), (4,6), (4,7) and (4,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,5) * L = 0.003650204$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,6) * L = 0.007440386$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,7) * L = 0.006585336$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,8) * L = 0.005190123 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 5

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (5,1), (5,2), (5,3) and (5,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,1) * L = 0.003870789$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,2) * L = 0.003902716$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,3) * L = 0.003675241$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,4) * L = 0.003675241 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 6

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (6,1), (6,2), (6,3) and (6,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,1) * L = 0.003890684$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,2) * L = 0.003663209$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,3) * L = 0.00370026$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,4) * L = 0.007453391 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 7

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (7,1), (7,2), (7,3) and (7,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,1) * L = 0.003658106$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,2) * L = 0.003658106$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,3) * L = 0.006593238$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,4) * L = 0.006593238 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 8

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (8,1), (8,2), (8,3) and (8,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,1) * L = 0.003664193$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,2) * L = 0.003701244$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,3) * L = 0.005515561$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,4) * L = 0.005515561 \quad L=0.8\text{cm}$$



Table. 3.7 Calculation of $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ using $v3$

V3 : 1388.452nm

Laser 1

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (1,5), (1,6), (1,7) and (1,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) * L = 0.00118469$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,6) * L = 0.001188575$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,7) * L = 0.001191631$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,8) * L = 0.001191631 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 2

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (2,5), (2,6), (2,7) and (2,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,5) * L = 0.001188137$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,6) * L = 0.001191193$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,7) * L = 0.001191193$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,8) * L = 0.001193655 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 3

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (3,5), (3,6), (3,7) and (3,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,5) * L = 0.001182838$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,6) * L = 0.001185301$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,7) * L = 0.002397095$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,8) * L = 0.002839158 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 4

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (4,5), (4,6), (4,7) and (4,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,5) * L = 0.001177425$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,6) * L = 0.002387108$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,7) * L = 0.002391681$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,8) * L = 0.003148666 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 5

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (5,1), (5,2), (5,3) and (5,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,1) * L = 0.001184198$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,2) * L = 0.001188084$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,3) * L = 0.001191114$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,4) * L = 0.001191114 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 6

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (6,1), (6,2), (6,3) and (6,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,1) * L = 0.00118438$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,2) * L = 0.001187436$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,3) * L = 0.001189898$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,4) * L = 0.002397119 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 7

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (7,1), (7,2), (7,3) and (7,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,1) * L = 0.001183884$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,2) * L = 0.001183884$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,3) * L = 0.00239814$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,4) * L = 0.00239814 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 8

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (8,1), (8,2), (8,3) and (8,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,1) * L = 0.001179902$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,2) * L = 0.001183348$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,3) * L = 0.002836222$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,4) * L = 0.003151143 \quad L=0.8\text{cm}$$

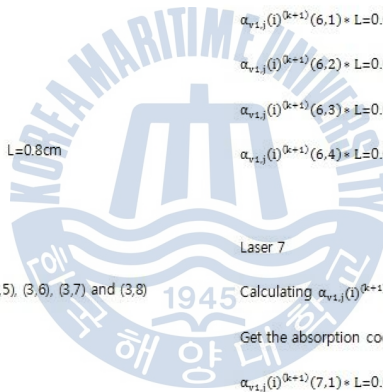


표 3.5, 3.6 및 3.7을 통해 구해진 흡수 계수를 이용하여, ART법에 의해 계산된 새로운 농도값을 구할 수 있다. 다음 식 3.15와 같이 Fig. 3.8에서의 (1,5) 좌표에 대한 식으로 표현가능하다.

$$n(k+1)(1,5) = n(k)(1,5) \times \left(\frac{\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) \cdot L}{\alpha_{v1,j}(i)^{(k)}(1,5) \cdot L} \right) \quad (3.15)$$

그 결과 주어진 농도값 $n(k)$ 와 새로 계산된 농도값 $n(k+1)$ 은 표 3.8과 같이 나타낸다.



Table. 3.8 Calculation of concentration

ART					
	Coordinates	1,5	1,6	1,7	1,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.01	0.01
	n(k+1)	0.0098899	0.0098929	0.0098955	0.0098955
	Coordinates	2,5	2,6	2,7	2,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.01	0.01
	n(k+1)	0.0098896	0.0098924	0.0098924	0.0098950
	Coordinates	3,5	3,6	3,7	3,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.02	0.025
	n(k+1)	0.0097869	0.0097920	0.0198123	0.0248440
	Coordinates	4,5	4,6	4,7	4,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.02	0.02	0.03
	n(k+1)	0.0097255	0.0197321	0.0197582	0.0298090
	Coordinates	5,1	5,2	5,3	5,4
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.01	0.01
	n(k+1)	0.0098937	0.0098965	0.0098991	0.0098991
	Coordinates	6,1	6,2	6,3	6,4
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.01	0.02
	n(k+1)	0.0098561	0.0098597	0.0098631	0.0198630
	Coordinates	7,1	7,2	7,3	7,4
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.02	0.02
	n(k+1)	0.0098232	0.0098232	0.0198440	0.0198440
	Coordinates	8,1	8,2	8,3	8,4
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.025	0.03
	n(k+1)	0.0097229	0.0097295	0.0024797	0.0298070

온도값은 표 3.5와 3.6을 활용하여 서로 다른 천이선(transition line)에서의 강도비인 R(ratio)로 구할 수 있으며, 식 3.16을 이용하여 좌표 (1,5)에 대한 R값을 구한다.

$$R(1,5) = \frac{\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5)}{\alpha_{v2,j}(i)^{(k+1)}(1,5)} \quad (3.16)$$

이를 통하여 Fig. 3.10와 같이 새로운 온도값을 구할 수 있다. 여기서, x축은 R(Ratio)값을 의미하며, y축은 온도(T)를 의미한다. 또한 Fig. 3.11은 초기 입력 온도와 ART법에 의한 새로운 온도값과의 비교를 나타내며, 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 3.12은 좌표에 대한 온도장을 나타내며, Fig. 3.13은 농도장을 보인다.

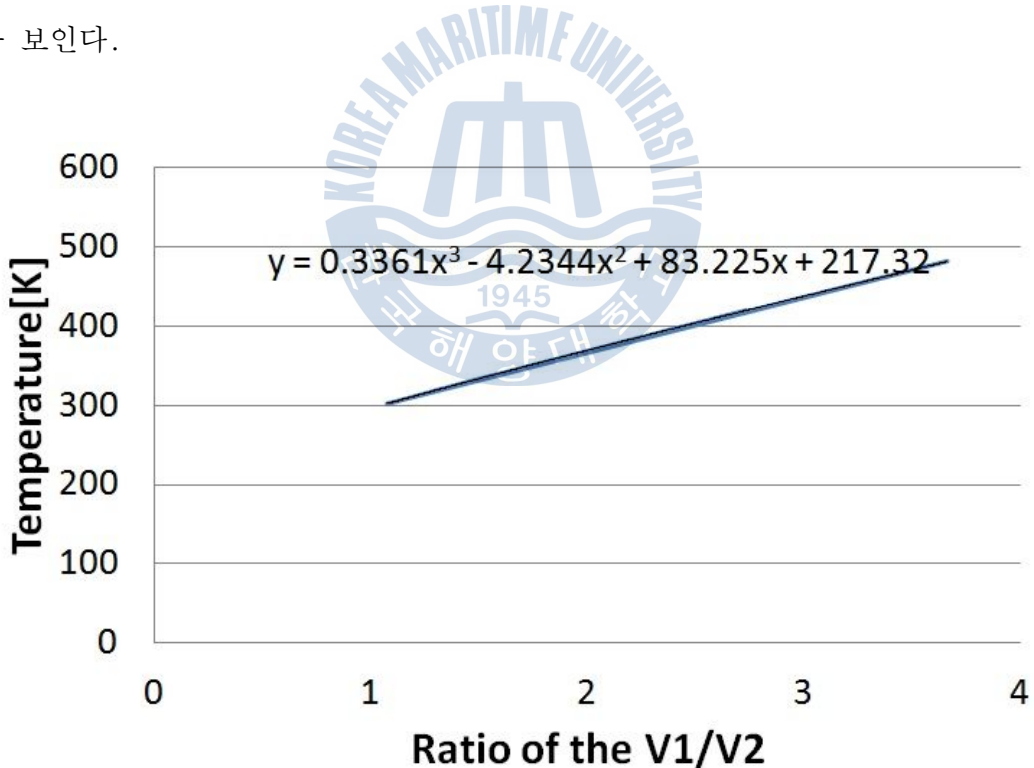


Figure. 3.10. Decision of new temperature and coccentration

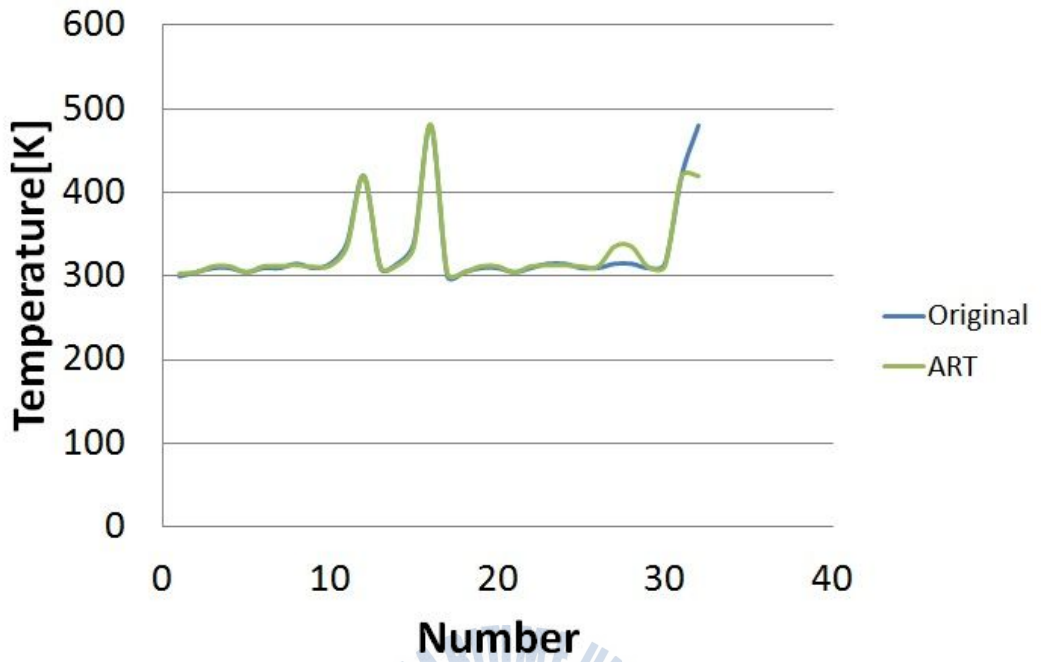


Figure. 3.11. Comparison of new and the original data



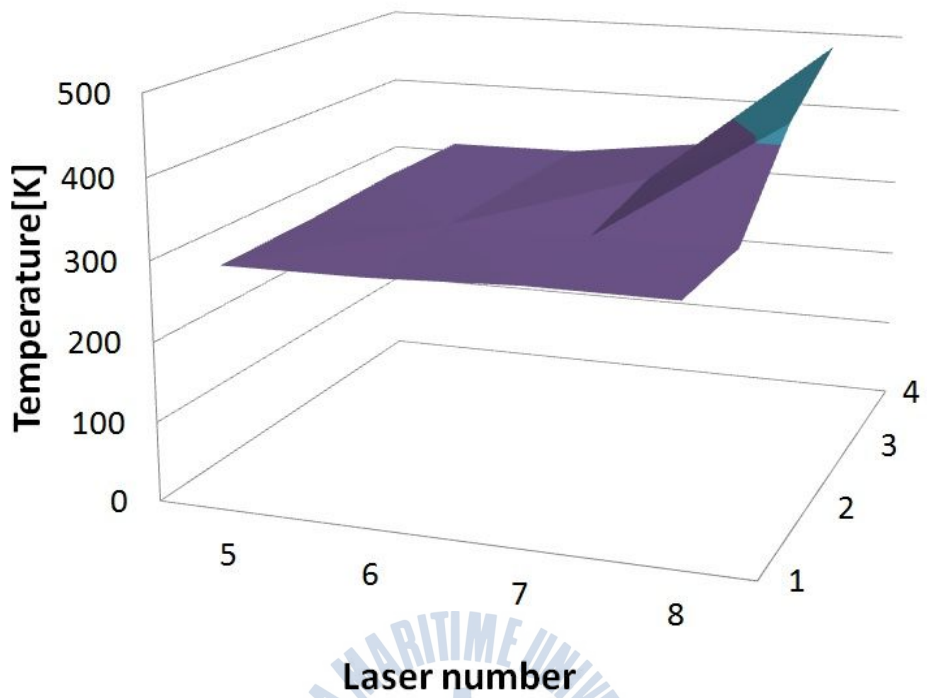


Figure. 3.12. Temperature fields using ART laws



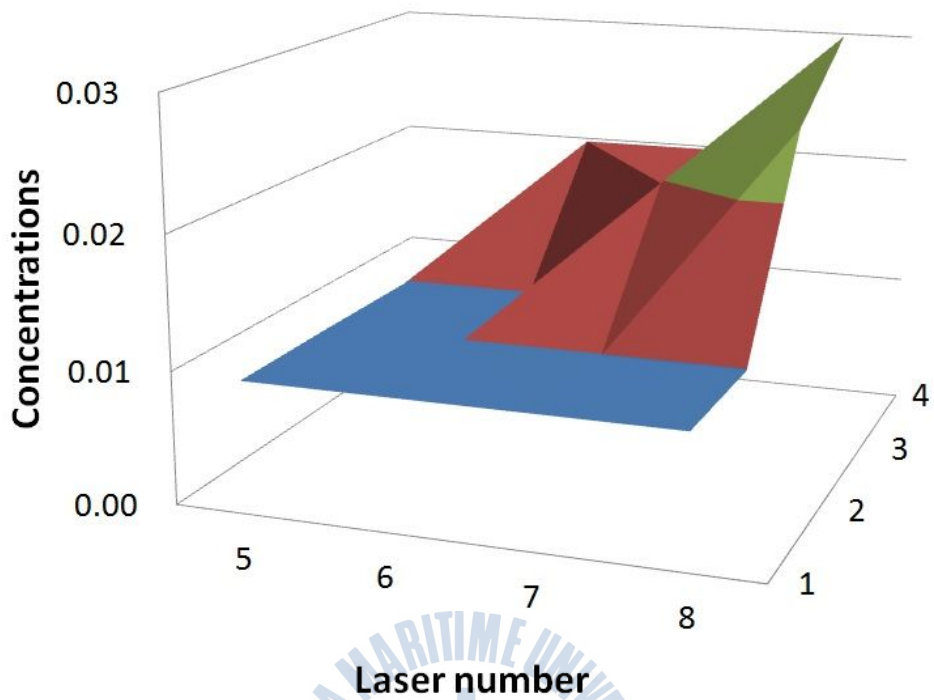


Figure. 3.13. Concentration fields using ART laws



3.3 온도장, 농도장 MART법 결과

가스원자에 흡수되는 흡수광은 Beer-Lambert 법칙(식 2.2)에 의해 표현되며, 흡수계수를 구하기 위해서 기존에 방식은 ART법을 응용한, 식 3.4와 같이 표현함으로 MART법으로 수정하여 식 3.13과 같이 표현한다. 이를 가상으로 구성하기 위해 Fig. 3.14과 같이 레이저 path에 대한 노드 점에 가상의 온도값과 농도값을 부여하고, Fig. 3.15과 같이 각 노드점에 대하여 좌표값을 레이저 순번에 따라 부여한다. Fig. 3.14와 Fig. 3.15의 데이터는 앞서 보인 ART법과의 비교를 위해 동일한 데이터를 사용한다.

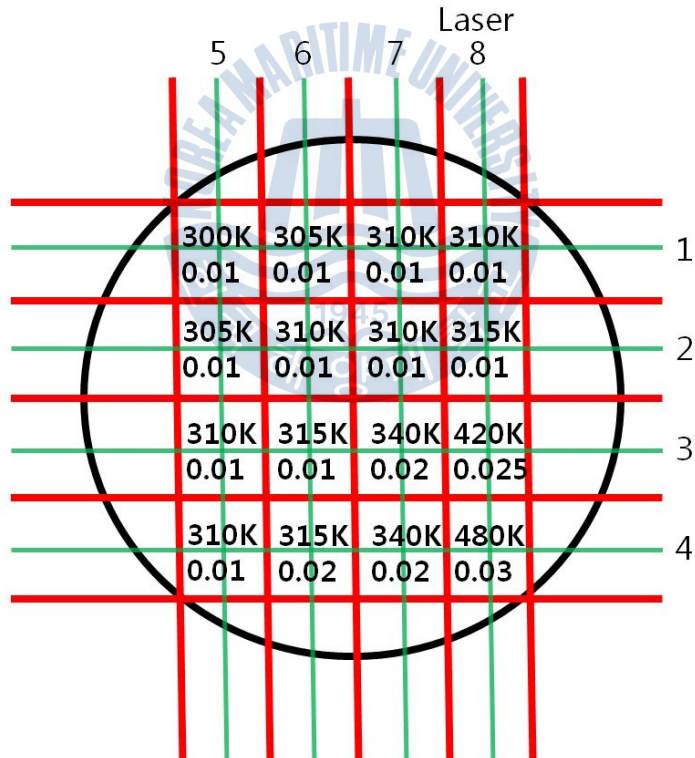


Figure. 3.14. Intial value setting

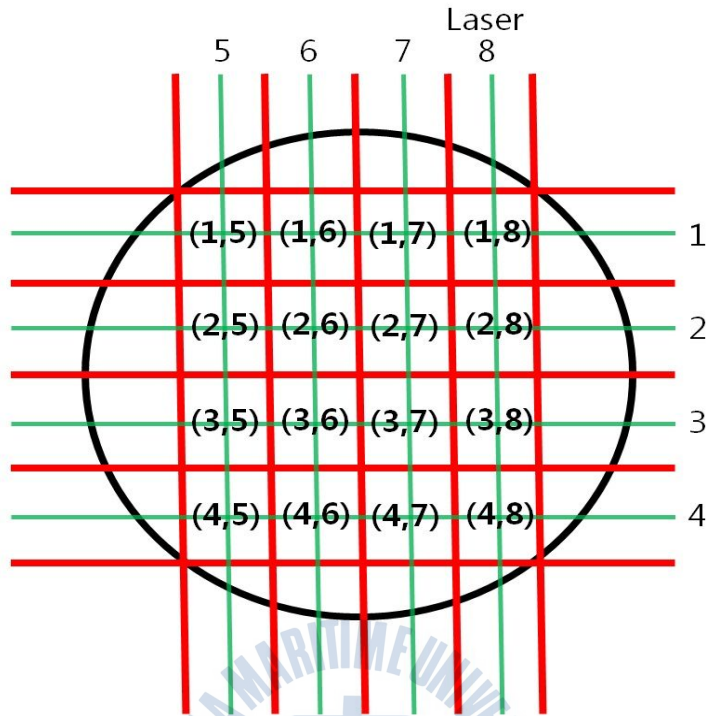


Figure. 3.15. Laser grid name

또한, Fig. 3.4와 같이 레이저의 흡수광 파장이 나타남으로 가상으로 표 3.9와 같이 설정하며, 표 3.1과 동일한 데이터를 사용한다.

Table. 3.9 Select three spectrum lines to calculate CT

V1	V2	V3
1388.136nm	1388.324nm	1388.452nm

MART법에 의한 흡수계수를 구하기 위해 식 3.16과 같이 표현한다.

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)} = \alpha_{v1,j}(i)^{(k)} \left[\frac{\sum_{i=1}^I \alpha_{v1,j}(i) \cdot L_{ij}}{\sum_{i=1}^I \alpha_{v1,j}(i)^{(k)} \cdot L_{ij}} \right]^{\mu L_{ij}} \quad (3.16)$$

여기서, 식 3.17과 같이 $\alpha_{v1,j}(i)$ 는 표현한다.

$$\alpha_{v1,j}(i) = n(i,j) \cdot S_{i,j}\{T(i,j),v1\} \cdot G_{v1,j} \cdot P \quad (3.17)$$

흡수계수 $\alpha_{v1,j}(i)$ 가 측정결과로부터 구해지지만, 식 3.17에서와 같이 농도(n)와 온도함수인 선강도(S)의 곱으로 나타나, n과 S의 계산이 일의적으로 계산되지 않는다.

따라서, 이를 계산하기 위해 v1과장일 경우 $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ 를 아래 표 3.10과 같이 레이저 path별 좌표값에 따라 표현한다. v2과장일 경우는 표 3.11과 같이 표현하며, v3과장일 경우는 표 3.12와 같이 나타낸다. 앞서 설명한 ART법과의 차이점은 흡수계수 $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ 를 구하는데 있다.

또한 MART법에 의한 수증기의 농도장, 온도장 가상측정 방법은 Fig. 3.16과 같다.

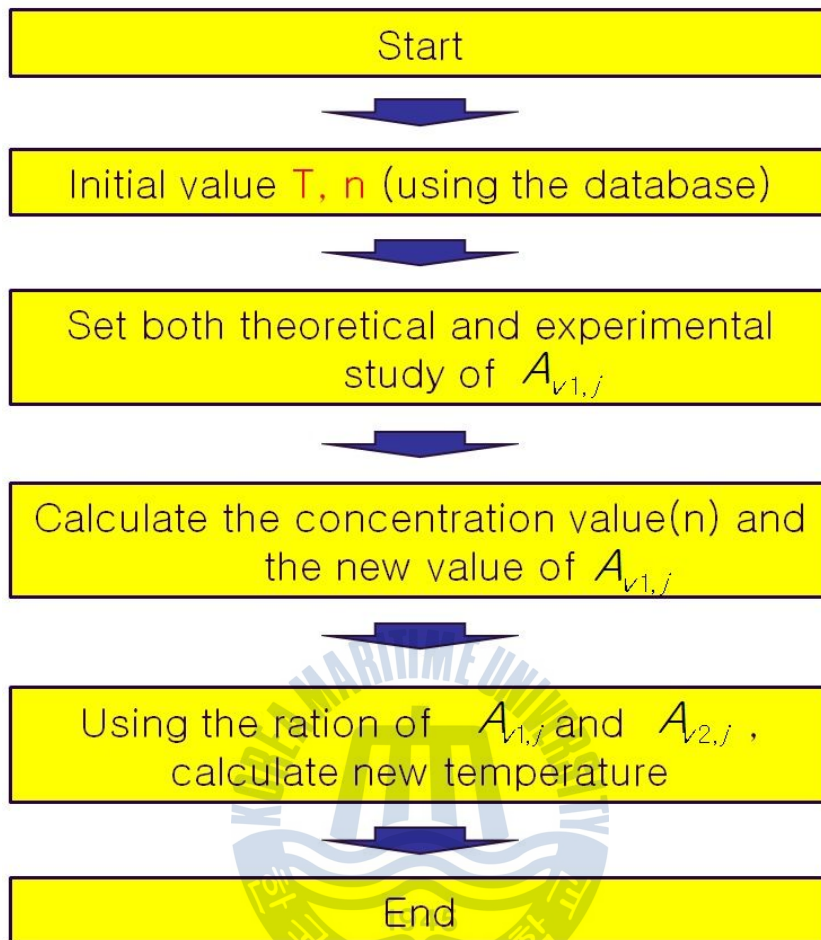


Figure. 3.9. Process of iterative virtual computation of tomography

Table. 3.10 Calculation of $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ using v1

V1 : 1388.136nm

Laser 1

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (1,5), (1,6), (1,7) and (1,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) * L = 0.004220007$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,6) * L = 0.004334676$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,7) * L = 0.004446389$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,8) * L = 0.004446389 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 2

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (2,5), (2,6), (2,7) and (2,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,5) * L = 0.004334697$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,6) * L = 0.004446353$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,7) * L = 0.004446353$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,8) * L = 0.00455132 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 3

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (3,5), (3,6), (3,7) and (3,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,5) * L = 0.004446367$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,6) * L = 0.00455151$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,7) * L = 0.010094113$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,8) * L = 0.015170134 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 4

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (4,5), (4,6), (4,7) and (4,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,5) * L = 0.004446368$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,6) * L = 0.009110309$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,7) * L = 0.010094128$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,8) * L = 0.019132666 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 5

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (5,1), (5,2), (5,3) and (5,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,1) * L = 0.004219988$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,2) * L = 0.004334692$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,3) * L = 0.004446364$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,4) * L = 0.004446364 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 6

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (6,1), (6,2), (6,3) and (6,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,1) * L = 0.004334697$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,2) * L = 0.004446389$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,3) * L = 0.004551516$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,4) * L = 0.009110368 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 7

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (7,1), (7,2), (7,3) and (7,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,1) * L = 0.004446372$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,2) * L = 0.004446362$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,3) * L = 0.010094256$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,4) * L = 0.010094256 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 8

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (8,1), (8,2), (8,3) and (8,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,1) * L = 0.004459107$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,2) * L = 0.001792294$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,3) * L = 0.012630767$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,4) * L = 0.022766665 \quad L=0.8\text{cm}$$

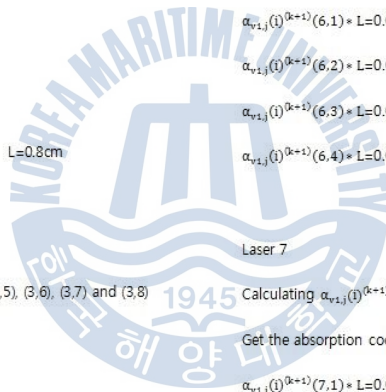


Table. 3.11 Calculation of $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ using v2

V2 : 1388.324nm

Laser 1

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (1,5), (1,6), (1,7) and (1,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) * L = 0.003913245$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,6) * L = 0.003944332$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,7) * L = 0.003713418$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,8) * L = 0.003713418$$

L=0.8cm

Laser 5

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (5,1), (5,2), (5,3) and (5,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,1) * L = 0.003912385$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,2) * L = 0.003943531$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,3) * L = 0.003712702$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,4) * L = 0.003712702$$

L=0.8cm

Laser 2

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (2,5), (2,6), (2,7) and (2,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,5) * L = 0.003945773$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,6) * L = 0.003714703$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,7) * L = 0.003714703$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,8) * L = 0.003751171$$

L=0.8cm

Laser 6

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (6,1), (6,2), (6,3) and (6,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,1) * L = 0.003947476$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,2) * L = 0.003715335$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,3) * L = 0.00375162$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,4) * L = 0.007504799$$

L=0.8cm

Laser 3

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (3,5), (3,6), (3,7) and (3,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,5) * L = 0.003741776$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,6) * L = 0.00377766$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,7) * L = 0.006659668$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,8) * L = 0.005548022$$

L=0.8cm

Laser 7

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (7,1), (7,2), (7,3) and (7,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,1) * L = 0.003723953$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,2) * L = 0.003723945$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,3) * L = 0.006645069$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,4) * L = 0.006645069$$

L=0.8cm

Laser 4

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (4,5), (4,6), (4,7) and (4,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,5) * L = 0.003753226$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,6) * L = 0.007541403$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,7) * L = 0.006665927$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,8) * L = 0.005223378$$

L=0.8cm

Laser 8

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (8,1), (8,2), (8,3) and (8,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,1) * L = 0.003768625$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,2) * L = 0.001492623$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,3) * L = 0.004626064$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,4) * L = 0.008338374$$

L=0.8cm

Table. 3.12 Calculation of $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ using v3

V3 : 1388.452nm

Laser 1

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (1,5), (1,6), (1,7) and (1,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) * L = 0.001197879$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,6) * L = 0.001201442$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,7) * L = 0.001204215$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,8) * L = 0.001204215 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 5

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (5,1), (5,2), (5,3) and (5,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,1) * L = 0.001196924$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,2) * L = 0.001200509$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,3) * L = 0.001203281$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(5,4) * L = 0.001203281 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 2

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (2,5), (2,6), (2,7) and (2,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,5) * L = 0.001201402$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,6) * L = 0.00120415$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,7) * L = 0.00120415$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(2,8) * L = 0.001206321 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 6

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (6,1), (6,2), (6,3) and (6,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,1) * L = 0.001201668$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,2) * L = 0.001204333$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,3) * L = 0.001206414$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(6,4) * L = 0.002413652 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 3

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (3,5), (3,6), (3,7) and (3,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,5) * L = 0.001208594$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,6) * L = 0.001210479$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,7) * L = 0.002419805$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(3,8) * L = 0.002856986 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 7

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (7,1), (7,2), (7,3) and (7,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,1) * L = 0.001205194$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,2) * L = 0.001205192$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,3) * L = 0.002416992$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(7,4) * L = 0.002416992 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 4

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (4,5), (4,6), (4,7) and (4,8)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,5) * L = 0.001210656$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,6) * L = 0.002419517$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,7) * L = 0.00242095$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(4,8) * L = 0.003168841 \quad L=0.8\text{cm}$$

Laser 8

Calculating $\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}$ from each of the grid (8,1), (8,2), (8,3) and (8,4)

Get the absorption coefficient

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,1) * L = 0.00121353$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,2) * L = 0.000477216$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,3) * L = 0.002378823$$

$$\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(8,4) * L = 0.004763869 \quad L=0.8\text{cm}$$

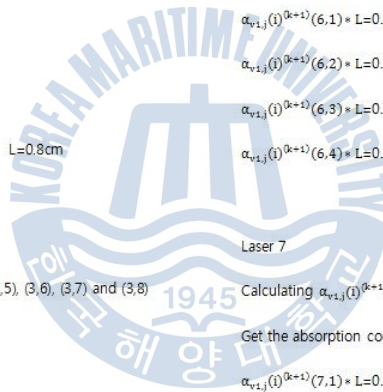


표 3.10, 3.11 및 3.12를 통해 구해진 흡수계수를 이용하여, MART법에 의해 계산된 새로운 농도값을 구할 수 있다. 다음 식 3.18과 같이 Fig. 3.15에서의 (1,5)좌표에 대한 식으로 표현가능하다.

$$n(k+1)(1,5) = n(k)(1,5) \times \left(\frac{\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5) \cdot L}{\alpha_{v1,j}(i)^{(k)}(1,5) \cdot L} \right) \quad (3.18)$$

그 결과 주어진 농도값 $n(k)$ 와 새로 계산된 농도값 $n(k+1)$ 은 표 3.13과 같이 나타낸다.



Table. 3.13 Calculation of concentration

MART					
	Coordinates	1,5	1,6	1,7	1,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.01	0.01
	n(k+1)	0.0099999997	0.0099999997	0.0099999997	0.0099999997
	Coordinates	2,5	2,6	2,7	2,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.01	0.01
	n(k+1)	0.0099999997	0.0099999997	0.0099999997	0.0099999997
	Coordinates	3,5	3,6	3,7	3,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.02	0.025
	n(k+1)	0.0099999995	0.0099999995	0.0199999995	0.0249999996
	Coordinates	4,5	4,6	4,7	4,8
Concentrations	n(k)	0.01	0.02	0.02	0.03
	n(k+1)	0.0099999993	0.0199999993	0.0199999994	0.0299999995
	Coordinates	5,1	5,2	5,3	5,4
Concentrations	n(k)	0,01	0.01	0.01	0.01
	n(k+1)	0.0099999997	0.0099999997	0.0099999997	0.0099999997
	Coordinates	6,1	6,2	6,3	6,4
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.01	0.02
	n(k+1)	0.0099999996	0.0099999996	0.0099999996	0.0199999996
	Coordinates	7,1	7,2	7,3	7,4
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.02	0.02
	n(k+1)	0.0099999995	0.0099999995	0.0199999996	0.0199999996
	Coordinates	8,1	8,2	8,3	8,4
Concentrations	n(k)	0.01	0.01	0.025	0.03
	n(k+1)	0.0099999993	0.0100000379	0.0250000123	0.0299999740

온도값은 표 3.10과 3.11을 활용하여 서로 다른 천이선(transition line)에서의 강도비(ratio)인 R로 구할 수 있으며, 식 3.19를 이용하여 좌표 (1,5)에 대한 R값을 구한다.

$$R(1,5) = \frac{\alpha_{v1,j}(i)^{(k+1)}(1,5)}{\alpha_{v2,j}(i)^{(k+1)}(1,5)} \quad (3.19)$$

이를 통하여 Fig. 3.17와 같이 새로운 온도값을 구할 수 있다. 여기서, x축은 R(Ratio)값을 의미하며, y축은 온도(T)를 의미한다. 또한 Fig. 3.18은 초기 입력 온도와 MART법에 의한 새로운 온도값과의 비교를 나타내며, 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 3.19은 좌표에 대한 온도장을 나타내며, Fig. 3.20은 농도장을 보인다.

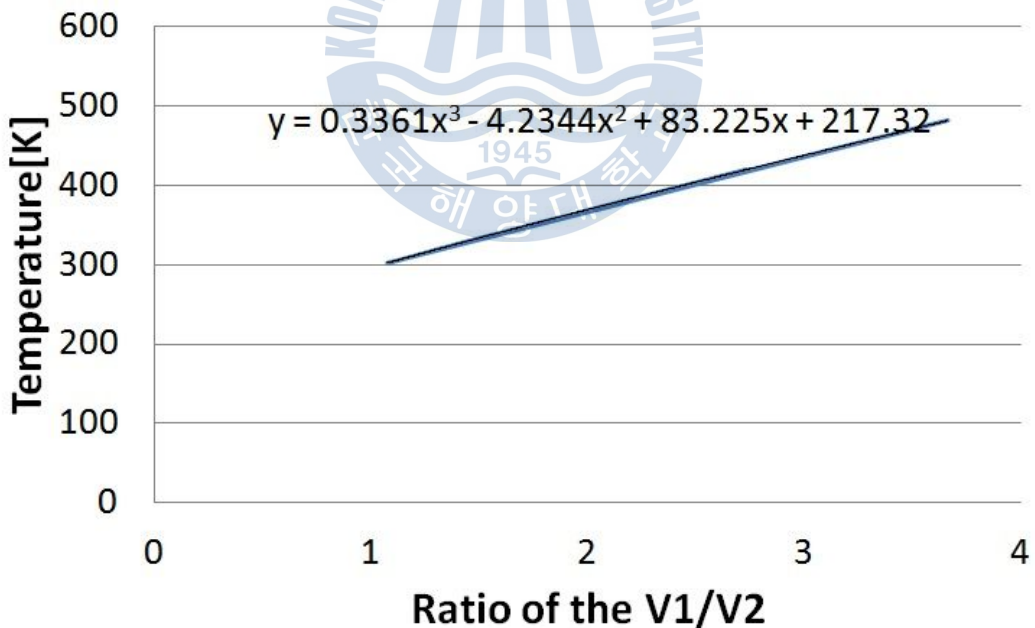


Figure. 3.17. Decision of new temperature and cocentration

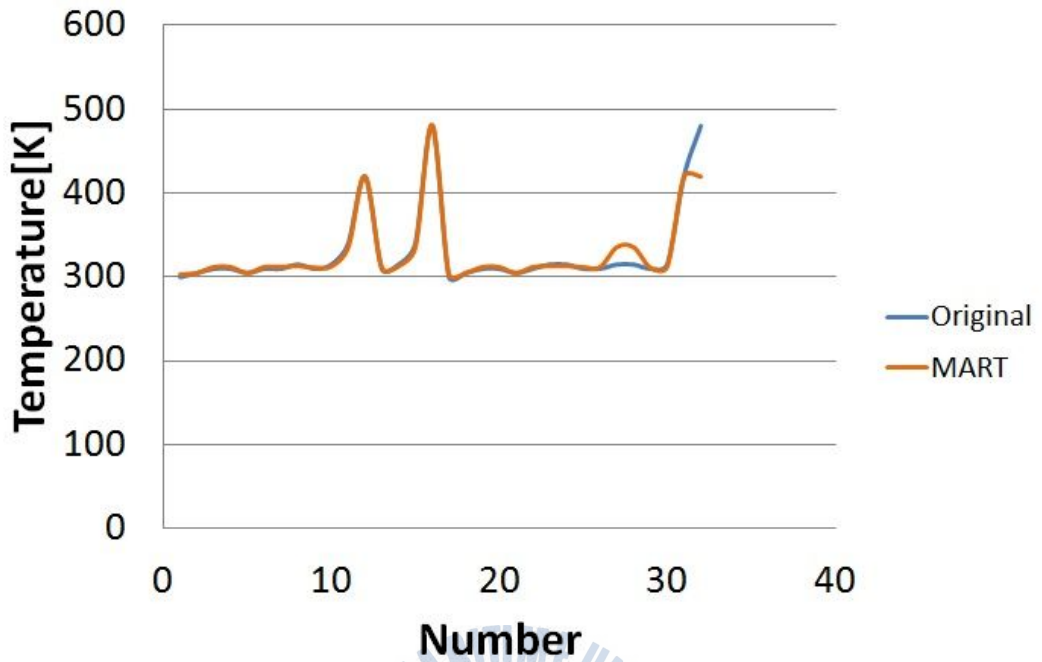
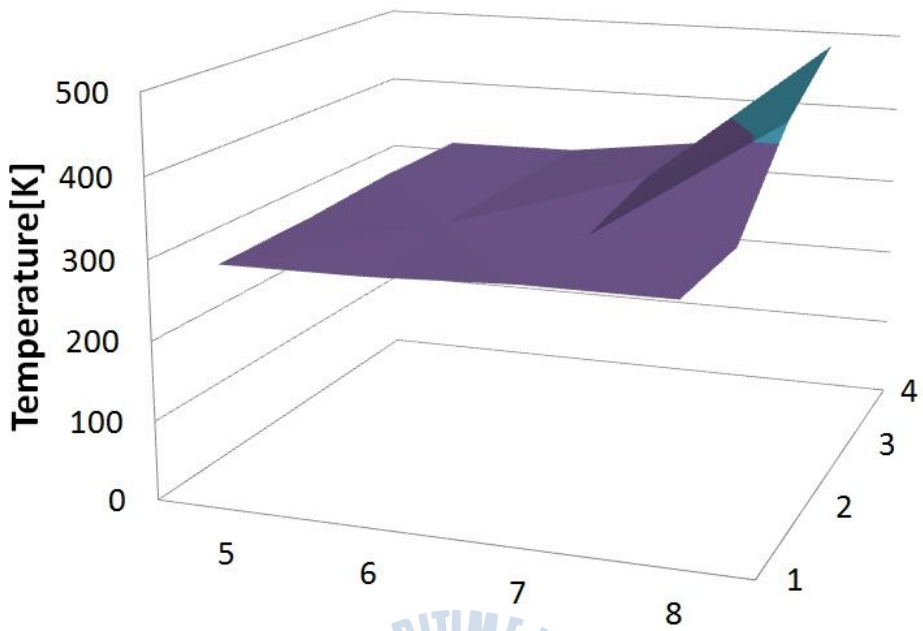


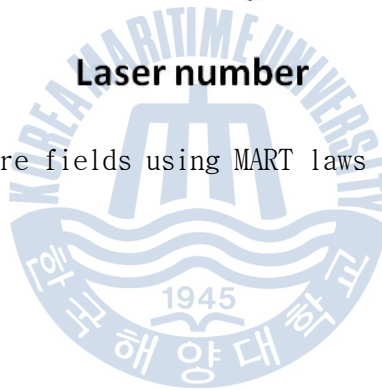
Figure. 3.18. Comparison of new and the original data





Laser number

Figure. 3.19. Temperature fields using MART laws



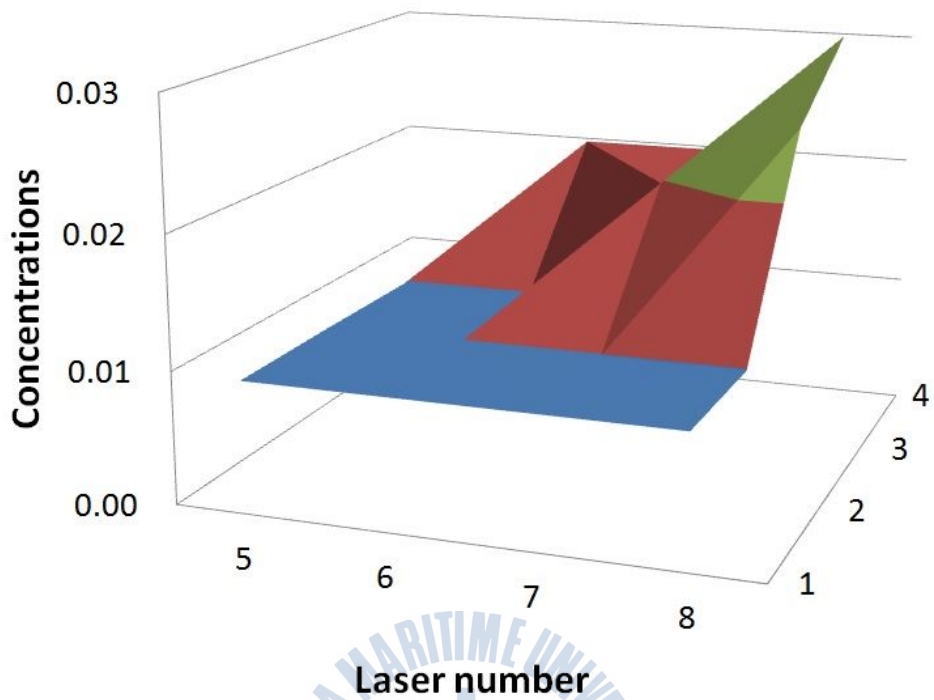


Figure. 3.20. Concentration fields using MART laws



제5장 결론 및 고찰

본 연구는 가스원자의 농도에 따른 흡수되는 빛의 성질을 이용한 Beer-Lambert 법칙을 활용하여, 가스의 농도 및 온도 측정에 대한 가상 측정방법이다. 스탠포드 대학의 HITRAN 데이터에서 가상 측정하고자 하는 H_2O 의 기본값에 대한 정보를 Beer-Lambert 법칙에 적용하였다. 기본적으로 농도값과 온도값을 찾고자 함이 목표임으로 이 두 가지의 미지수에 대하여 임의의 값을 제시하였으며, 그 값에 대하여 토모그래피 기술인 ART법과 MART법을 활용하여 새로운 농도값과 온도값을 구하였다. 새롭게 생성된 농도값과 온도값을 초기 데이터와 비교함으로써, 가상결과의 정밀도를 판단하였다. 그 결과 농도값은 ART법보다 MART법이 오차가 적었으며, 최소 오차에 도달하는 시간 또한 MART법이 짧으므로 보다 정확하고 신속한 토모그래피 기법임을 알 수 있다. 또한 온도값의 경우는 ART와 MART의 결과가 초기 값과 큰차이를 보이지 않음을 확인하였으며, ART와 MART의 결과는 거의 일치 하였다. 이와 같이 ART법과 MART법을 이용하여 흡수계수를 구하는 성능평가에서는 MART법이 보다 우수함을 확인할 수 있다.

본 논문의 결과를 통해 새로운 온도와 농도데이터를 MART법을 이용하여 흡수계수를 구한다면, 보다 신속하고 신뢰할 수 있는 데이터를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

M. P. Arroyo, R. K. Hanson, “Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser” , Applied Optics, 1993, Vol. 32, No. 30, pp.6104-6116.

S. H. Baek, S. S. Ahn, H. S. Ko, “ Development of combined optical system for analysis of impinging butane flame” , proc. of KSV Fall Conference, 2005, PNU, pp.69-73.

H. J. Cha, “A study on measurement of carbon dioxide concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) system” , Ms Thesis, Yonsei Univ., 2004.

W. Cai, D. J. Ewing, L. Ma, “Application of simulated annealing for multispectral tomography” , Computer Physics Communications, 2008, Vol. 179, No. 4, pp.250-255.

Y. Deguchi, Y. Daisuke, A. Akira, “Development of 2D temperature and concentration measurement method using tunable diode laser absorption spectroscopy” , Journal of Mechanics Engineering and Automation, 2012, Vol. 2, 2012, pp.543-549.

Y.J. Kim, H. S. Ko, K. Okamoto, “A study on simultaneous analysis of velocity and density distributions for high-speed CO₂ flow” , proc. of KSV Fall Conference, 2005, PNU, pp.40-45.

D. H. Kim, M. C. Shin, S. W. Kim, “Multiplexing measurement of CO and CO₂ concentration using DFB diode laser” , The Korean Society of Mechanical Engineers, 2006, Vol. 2006, No. 6, pp.1845-1850.

H. S. Ko, Y. J. Kim, K. Okamoto, "A study on simultaneous analysis of velocity and density distributions for high-speed CO₂ flow", Proc. of Annual Fall Conference of Korean Society of Visualization, Conference, 2005, PNU, pp.40-45.

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

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

L. Ma, W. Cai, A. W. Caswell, T. Kraetschmer, S. T. Sanders, S. Roy, J. R. Gord, "Tomographic imaging of temperature and chemical species based on hyperspectral absorption spectroscopy", Optics Express, 2009, Vol. 17, No. 10, pp. 8602-8613.

F. Wang, K. F. Cen, N. Li, J. B. Jeffries, Q. X. Huang, J. H. Yan, Y. Chi, "Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode laser absorption spectroscopy", Measurement Science and Technology, 2010, Vol. 21, No. 4, pp.1-10.

H. Yu, B. M. Wilamowski, "Levenberg Marquardt Training", Industrial Electronics Handbook, Vol. 5 - Intelligent Systems, 2nd Edition, 2010, Chapter 12, pp.1-16.

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