

다이오드 레이저를 이용한 광흡수 농도 계측 기법 (I)

안재현* · 김용모** · 김세원***

Species Concentration Measurement Using Diode Laser Absorption Spectroscopy (I)

Jae-Hyun Ahn*, Yong-Mo Kim**, Se-Won Kim***

ABSTRACT

Diode laser absorption sensors are advantageous because they may provide fast, sensitive, absolute, and selective measurements of species concentration. These systems are very attractive for practical applications owing to its compactness, reasonable cost, robustness, and ease of use. In addition, diode lasers are fiber-optic compatible and thus enable simultaneous measurements of multiple species along a line-of-sight. Recent advances of room-temperature, near-IR and visible diode laser sources for telecommunication, optical data storage applications make it possible to be applied for combustion diagnostics based on diode laser absorption spectroscopy. Therefore, combined with fiber-optics and high sensitive detection strategies, compact and portable sensor systems are now appearing for variety of applications. The objectives of this research are to develop a new gas sensing system and to verify feasibility of this system. Wavelength and power characteristics as a function of injection current and temperature are experimentally found out. Direct absorption spectroscopy has been demonstrated in these experiments and has a bright prospect to this diode laser system.

Key Words : TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), Combustion diagnostics, DFB(Distributed feed-back) diode laser, Direct absorption, Carbon dioxide.

기 호 설 명

I_ν	Monochromatic laser intensity at frequency ν	P_{2f}	The measured peak $2f$ signal at the line-center ν_0
$S(T)$	The line-strength function	I_0	The incident laser intensity
Φ	The line-shape function	S	The line-strength of the probed transition
N	Absorbing species number density	$\Delta\nu$	The collisional line-width (HWHM) of the probed transition
L	Measurement path length	m	Modulation index
Q	The total molecular internal partition function	k	Boltzmann's constant
E	The energy of the lower transition state	c	The speed of light
h	Planck's constant		

* 한양대학교 대학원

** 한양대학교 기계공학부

*** 한국생산기술연구원

† 연락처, jhahn2k@paran.com

1. 서론

전세계적으로 환경 문제가 사회적 이슈로 크게 부각됨에 따라 공해 물질의 저감 노력이 활발히 진행되고 있는 가운데, 국내에서도 이에 대한 연구와 노력이 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 실시간으로 배기가스의 농도와 온도 등을 계측함으로써 연소 시스템의 운전 상태를 파악하고, 이를 바탕으로 최적의 운전 조건을 유지함으로써 배출되는 공해 물질을 저감하는 이른바 능동적 저감기술이 최근 들어 주목 받고 있다. 이러한 실시간 연소시스템 제어를 위한 계측 시스템은 계측이 정확하고 안정적이면서도, 척박한 산업 환경에 적용이 가능하도록 강건함을 갖추어야 한다. 지금까지는 주로 추출식 가스분석기가 많이 적용되어 왔다. 그러나 이런 추출식 가스분석기의 경우, 매우 고가일 뿐 만 아니라 연소가스의 추출에 상당히 긴 시간을 요구하기 때문에 실시간 제어를 위한 계측 시스템으로는 그 한계를 가지고 있다.

이에 대한 대안으로 레이저 유도 형광법(LIF)이나 CARS 등 레이저를 이용한 계측기법에 대한 연구가 한동안 상당히 활발하게 진행되어 왔다. 그러나 이런 광계측 기법은 대부분 고출력, 고가의 레이저 사용을 요구하며, 복잡한 광학계 구성 및 측정기술의 어려움으로 인해 산업용 시스템에 적용되기 보다는 이론적 원리 규명을 위한 실험이나 측정에 한정되어 적용되고 있는 실정이다. 또한 전기화학적 반응을 이용한 가스 센서의 경우, 저렴한 가격, 간단한 시스템 구성 등의 장점을 가지고 있지만, 센서 표면의 오염이나 장시간에 걸친 연속적인 계측이 진행될 경우, 심각한 계측 정밀도의 저하가 발생한다.

이에 비해, 최근 광통신 분야의 발전으로 인해, 다양한 파장의 다이오드 레이저 개발됨에 따라 이를 이용한 광 흡수법에 대한 연구가 미국과 유럽을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 이는 다이오드 레이저가 소형이고 내구성이 우수할 뿐만 아니라, 응답성이 빠르며, 광섬유와 함께 사용되므로 설치 및 유지보수가 쉬운 장점을 가지고 있기 때문이다. 또한 연소 생성물을 동시에 실시간으로 계측할 수 있으므로, 연소 시스템의 모니터링에 유용하게 쓰일 수 있다.

연소 시스템에서 발생하는 다양한 종류의 연소가스는 Table 1과 같이 각각 고유의 흡수 파장영역을 가지고 있다. 다이오드 레이저 흡수분광 시스템은 이런 특성을 이용하여, 계측하고자 하는 대상 가스의 고유 흡수 파장과 동일한 파장의 레이저 광을 조사하고 이를 계측하여 가스에서 흡수되는 양을 측정하는 비교적 간단한 비접촉식 광계측 기법을 이용하여 일반 계측기로는 계측이

Table 1 Wavelength distribution of traditional exhaust gas.

Species	Wavelength [nm]	Band Center [cm ⁻¹]
NO ₂	670	14925
O ₂	760	13157
CO	1560	6410
CO ₂	1570	6369
NO	1790	5586

불가능한 중간 생성물 및 회귀 가스의 계측까지 가능하다. 또한 광학 경로의 조정을 통해 수 천 ppm에서 수 ppb까지의 넓은 범위의 계측 정밀도 조정이 가능하다.

본 연구에서는 파장 가변 다이오드 레이저 광 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)을 이용하여 주요 연소생성물 중 하나인 이산화탄소를 대상으로 농도 계측 실험을 수행하였다. 이를 위해 먼저 주입 전류와 온도의 변화에 따른 다이오드 레이저의 출력 및 파장의 변화를 살펴보는 특성 분석 실험을 수행하였으며, 직접흡수법(Direct absorption method)을 통하여 이산화탄소의 흡수 특성을 분석하고, 분광학적 데이터베이스를 이용하여 얻은 분광학적 변수 산출 및 실험 결과와의 비교, 분석을 통하여 정량적 계측의 토대를 구축하였다.

2. 이론적 배경

2.1 흡수분광법(Absorption Spectroscopy)

특정 기체에 의해 이루어지는 광 흡수의 분광학적인 특성은 식(1)과 같이 Beer-Lambert 관계식에 의해 나타낼 수 있다. 대상 기체 통과 전의 빛의 강도에 대한 통과 후의 강도의 비로 정의되는 투과율은 대상 기체 분자의 수밀도(N)와 통과거리(L), 그리고 흡수의 분광학적 특성인자인 선강도(linestrength)와 선형상 함수(lineshape function)의 지수함수 형태로 표시된다[1-3].

$$T(\nu) = \frac{I_t}{I_0} = \exp[-S(T)\Phi(\nu-\nu_0)NL] \quad (1)$$

여기서, $S(T)$ 는 선강도(line strength)를 나타내며, 이는 온도에 의존하는 함수이고, $\Phi(\nu-\nu_0)$ 는 선형상 함수(lineshape function)로서 온도와 압력에 따라 변화하는 함수이다. 어떤 임의의 온도에서의 linestrength $S_i(T)$ 는 기준 온도에서의

$S_i(T_0)$ 와 다음 관계식에 의해 나타낼 수 있다[4].

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T}\right) \times \exp\left[\frac{-hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times [1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_0}{kT}\right)] [1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_0}{kT_0}\right)]^{-1} \quad (2)$$

$Q(T)$ 는 분할 함수(partition function)로서, 다음 관계식 (3)과 같이 간략하게 온도에 대한 3차 다항식으로 나타낼 수 있다[5].

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

선형상 함수 $\Phi(\nu - \nu_0)$ 는 분자의 천이 주파수의 확산을 나타내는 함수로서, 분자의 열적 운동에 의한 도플러 선폭확대(Doppler broadening)와 분자간의 충돌에 의한 충돌 선폭확대(Lorentzian broadening)의 조합으로 구성되어진다.

도플러 선폭확대는 도플러 한계 내에서 흡수 라인의 FWHM(full width at half maximum)인 Doppler 폭 $\Delta\nu_D$ 으로 정량화되어 진다[6].

$$\Delta\nu_D = \nu_0 (7.1623 \times 10^{-7}) \left(\frac{T}{M}\right)^{1/2} \quad (4)$$

분자의 충돌에 의해 선폭이 넓어지는 효과는 다음과 같이 Lorentzian 분포로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_C(\nu) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\nu_C}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_C}{2}\right)^2} \quad (5)$$

여기서, 주어진 온도에서의 충돌 선폭은 직접적으로 압력에 비례하게 된다.

$$\Delta\nu_C = P \sum_A X_A 2\gamma_A \quad (6)$$

그리고 broadening 계수의 온도 변화에 대한 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$2\gamma(T) = 2\gamma(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^N \quad (7)$$

온도 계수인 N은 일반적으로 1보다 작기 때문에 충돌 선폭확대는 온도가 증가함에 따라 감소하게 된다. 특정 압력 부근에서 (약 500 Torr) 실제 lineshape 함수는 Doppler 효과에 의해 형성되는 Gaussian 분포와 충돌에 의한 Lorentzian 분포가 동시에 발생하게 되고, 실제 조건에서는 이 두 가지 특성이 조합된 특성을 나타내게 된다. 이를 고려하기 위해 진술한 두 가지 선폭확대의 역 상관관계(convolution)로 정의되는 Voigt

profile를 사용한다[8].

$$\Phi_V(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_D(u) \Phi_C(\nu - u) du \quad (8)$$

중심주파수 ν_0 에서의 도플러 선형상 $\Phi_D(\nu_0)$ 와 무차원 변수 a 및 w 의 정의를 이용하면, Voigt 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\Phi_V(\nu) = \Phi_D(\nu_0) V(a, w) \quad (9)$$

Voigt a 변수는 Doppler와 충돌에 의한 선폭 넓어짐의 상대적인 중요도를 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$a = \frac{\sqrt{\ln 2} \Delta\nu_C}{\Delta\nu_D} \quad (10)$$

Voigt w 변수는 흡수 라인 중심으로부터의 거리를 무차원으로 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \frac{2\sqrt{\ln 2}(\nu - \nu_0)}{\Delta\nu_D} \quad (11)$$

Figure 1은 Lorentzian, Gaussian 선형상 함수 및 동일 선폭에서의 Voigt 선형상 함수를 비교하여 나타낸 것이다.

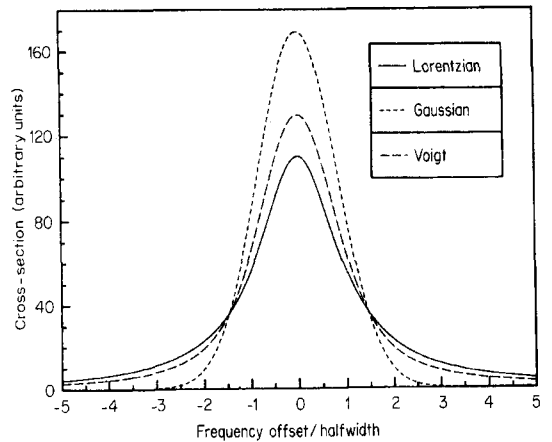


Fig. 1 Lorentzian, Gaussian, and Voigt line-shapes($\Delta\nu_D = \Delta\nu_C$)

2.2 CO₂ 흡수 라인 선정

CO₂와 같은 선형적인 분자들은 일반적으로 그것들의 관성 모멘트와 관련한 2원자로서 취급되어질 수 있다 (¹²C¹⁶O₂ 기준). 이것은 선형적이고 대칭적이기 때문에 불변의 쌍극자 모멘트를 가지고 있으며 대칭적이기 때문에 불변의 쌍극자 모

먼트를 가지지는 않는다. 게다가, CO₂는 단지 쌍극자가 bending 또는 비대칭 stretching에 의해 유도될 때 IR 영역에서 분광학적으로 활동적이다[9].

CO₂에 대한 흡수 파장, 선강도, 선폭 확대 계수 등 각종 분광학적인 변수들은 지구 대기 흡수 분광 분석을 위해 Rothman[10] 그룹에서 개발한 HITRAN 데이터베이스를 이용하여 산출하였다. 이 데이터베이스를 통해 다른 가스와 흡수 상호 간섭을 피할 수 있는 최적 흡수 파장의 선정 및 예측된 결과의 정량화를 위한 각종 인자를 결정하였다. Fig. 2는 근적외선 영역(Near infrared)의 CO₂의 흡수 스펙트럼으로, 1600 nm와 2000 nm 부근에서 넓은 흡수 밴드가 존재하고, 2000 nm 부근이 1600nm 영역에 비해 훨씬 더 강한 선강도를 가지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 H₂O 등 다른 가스에 의한 간섭 효과가 적고 광통신용으로 널리 사용되는 DFB 다이오드 레이저의 발진 파장과 유사한 1575 nm 부근의 2ν₁+2ν₂+ν₃ 파장을 예측 대상으로 선정하였다.

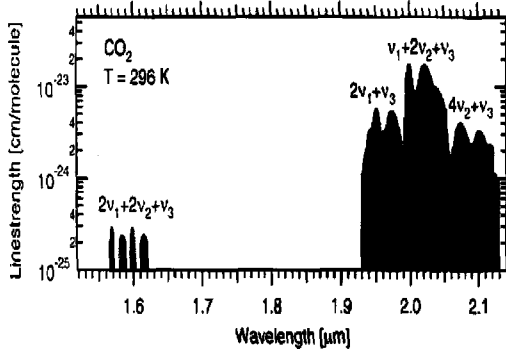


Fig. 2 CO₂ spectra of absorption bands using Herzberg notation

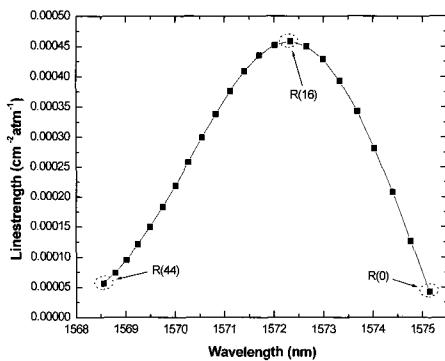


Fig. 3 Predicted CO₂ linestrength from 1568-1575nm using HITRAN 2002(296K, 1atm)

그리고 Fig. 3과 같이 HITRAN 데이터베이스를 이용해서 얻은 선강도의 비교를 통해 R(16) 라인이 2ν₁+2ν₂+ν₃ 밴드에서 제일 강한 흡수 선강도를 가지고 있음을 확인할 수 있고, 이를 예측 흡수 파장으로 결정하였다. CO₂ 분자의 특성 및 주요 흡수 band를 Table 2, 3에 나타내었으며, 이 조건에서의 온도에 따른 분할 함수(partition function)의 다항식 계수를 나타내면 다음 Table 4와 같다.

Table 2 Fundamental features of CO₂

Vibration	Frequency [cm ⁻¹]	Description
ν ₁	1333	symmetric stretch
ν ₂	667	bending(degenerate)
ν ₃	2349	asymmetric stretch

Table 3 Spectroscopic parameters at 1.5-2 μm by Herzberg, HITRAN schemes

Band Center [nm(cm ⁻¹)]	Herzberg	HITRAN
1575(6349)	2ν ₁ +2ν ₂ +ν ₃	30011←-00001
1957(5109)	2ν ₁ +ν ₃	20011←-00001
2006(4984)	ν ₁ +2ν ₂ +ν ₃	20012←-00001
2057(4861)	4ν ₂ +ν ₃	20013←-00001

Table 4 Coefficients of the polynomial expression for Q(T) for CO₂

계수	70<T<500K	500<T<1500K	1500<T<3000K
a	-1.3617	-5.0925e2	-3.4938e4
b	9.4899e-1	3.2766	66.965
c	-6.9259e-4	-4.0601e-3	-4.4010e-2
d	2.5974e-6	4.0907e-6	1.2662e-5

3. 실험 장치 및 방법

3.1 가스 셀 시스템

다이오드 레이저의 특성 분석과 가스의 정량적인 계측을 위해, Fig. 4 ~ Fig. 6에서 보는 바와 같이 가스 셀(gas cell)을 이용한 측정 시스템을 구성하였다. Cell은 레이저 빔을 통과시키기 위해 양단 끝부분에 지름 50mm의 고 투과율을 가진 투명창으로 구성되어 있으며, 흡수 길이 700mm로 정밀 제작하였고, 빔의 내부 반사를 최소화하기 위하여 cell 내부를 야노다이징 착색을 하였다. 레이저 광의 흡수가 발생하지 않는 질소 가스와 이산화탄소 가스의 분압 조절을 통해 가스 농도를 조절하였으며, 분압의 측정은 미세차

압계를 이용하여 측정하였으며, 대상 가스의 온도 계측을 위해 가스셀 중심부 상단에 영점 보정한 T-type 열전대를 사용하여 가스의 온도를 측정하였다.

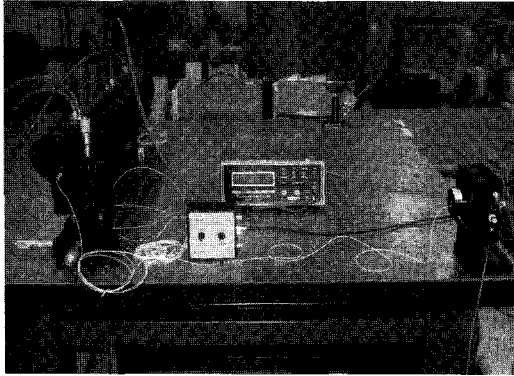


Fig. 4 Photograph of reference gas cell system

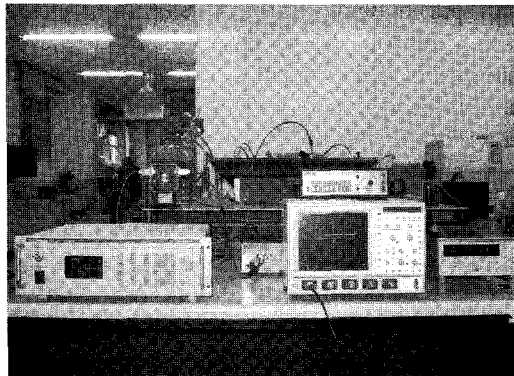


Fig. 5 Photograph of TDLAS(tunable diode laser absorption spectroscopy) system

3.2 다이오드 레이저 흡수분광 시스템

다이오드 레이저 흡수분광 시스템은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 크게 레이저 발진부, 광섬유 연결부, 수광부의 3부분으로 구성된다. 발진부는 다시 다이오드 레이저 컨트롤러와 마운트, 신호 발생기 및 다이오드 레이저 소자부로 구분되어진다. 다이오드 레이저의 발진특성은 미세한 주입 전류와 온도 변화에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 계측에 필요한 파장의 레이저 광을 얻기 위해서는 다이오드 레이저의 주입전류와 온도를 정밀 제어하여야 한다. 이를 위한 다이오드 레이저 컨트롤러는 다이오드 레이저에 공급되는 전류를 조절하는 전원제어부와 다이오드 레이저 소자의 온도를 정밀하게 조절하는 온도제어부로 구성되어진다. 다이오드 레이저의 온도를 조절하는 마운트는 10kΩ thermistor가 부착되어 다이오드 레이저 소자의 온도를 측정하고, 마운트 내부에 부착된 열전소자(thermoelectric element)를 이용하여 온도제어부에 의해 온도가 조절되어진다.

흡수 선 형상 및 흡수 밴드를 파악하기 위해서는 다이오드 레이저의 발진 파장을 변화시켜가며 흡수 영역을 주사(scanning)하여야 한다. 이를 위해 신호 발생기(waveform generator)를 사용하여 50Hz 정도의 램프파(ramp wave)를 생성하고 생성파형의 진폭(amplitude)을 조절하여 다이오드 레이저 발진 파장 가변 범위를 결정하였고, 이렇게 생성된 파형을 다이오드 레이저 컨트롤러에 공급하여 다이오드 레이저 입력 주사전류를 동조시킴으로써 레이저 발진파장을 변화하였다.

광원으로 사용된 다이오드 레이저는 이산화탄소의 고유 흡수 파장과 근접한 발진 파장을 가지는 1567nm, 20mW 정격 출력을 가지는 SM(single mode) type의 14-pin butterfly DFB(Distributed Feed-back) 방식의 다이오드 레이저 소자를 사용하였으며, 가시광 영역대인 635nm의 파장을 가지는 출력 5mW pigtailed type의 DBR 다이오드를 적용하여 광학계 정렬에 사용하였다.

광섬유 연결부는 광 부품 정렬의 편리성 및 현장 적용에 용이한 광섬유(fiber-optic) 방식을 채택하였으며, 이는 isolator, collimator, coupler, connector로 구성된다. Coupler는 isolator에서 나온 빔을 기준 신호(reference signal)와 통과 신호(transmitted signal)로 분기시켜 주기 위해 사용되었다. Isolator는 최초 다이오드 레이저 소자에 연결되어, 레이저 광의 전달과정에서 발생할 수 있는 역 반사(back-reflection)로부터 다이오드 레이저 소자를 보호하고 간섭현상으로 인해 발생하는 etalon effect를 최소화하기 위해 사용하였다. Collimator는 광섬유로부터 나온 레이저 광의 확산을 방지, 직진성을 유지하고, 또한 가스

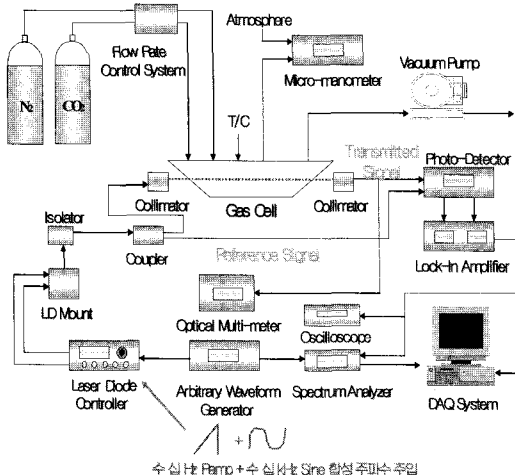


Fig. 6 Schematic of TDLAS system.

셀을 통과한 광을 다시 광섬유로 집광하기 위해 사용되었으며, 렌즈 표면에서의 반사를 방지하기 위해 AR(Anti-Reflection) 코팅이 된 aspheric lens를 사용하였다. 그리고 가스 셀 양단에 위치한 collimator는 translation stage와 goniometer에 부착하고, 이를 이용하여 X, Y, Z의 3축 위치 및 상하, 좌우 방향의 각도 변화를 주어 최적 집광 효율 위치를 결정하였다. 모든 광섬유 부품들의 연결부는 광섬유의 접합부에서의 레이저 광 반사를 방지하기 위해 APC type으로 제작하였다.

수광부는 auto-balanced photo-receiver, 디지털 오실로스코프, 신호 분석 및 수집용 컴퓨터로 구성된다. Auto-balanced photo-receiver는 coupler에서 분기된 기준 신호와 cell을 지난 통과 신호를 동시에 계측하고, 이를 서로 상호 비교하여 신호 중에 포함되어 있는 동상잡음(common mode noise)을 제거함으로써 계측 정밀도를 개선하였다. 여기서, 검출된 신호는 증폭되어지며, 직접 흡수기법에서는 이 증폭된 신호를 오실로스코프를 통해 계측하여 GPIB를 통해 신호해석을 위한 컴퓨터로 보내지게 된다. 여기서 신호분석 및 분광학적 변수들의 반영 과정을 거쳐 농도로 변환된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 주입 전류와 온도 변화에 따른 출력 및 파장 특성

DFB 방식 다이오드 레이저는 주입 전류와 온도에 의해 방출되는 레이저 광의 출력과 파장이 결정된다. 그러므로 대상가스의 흡수 파장과 일치하는 레이저 광을 얻기 위해서는 다이오드 레이저의 발진 특성에 대한 고찰이 필수적으로 선행되어야 한다. 본 연구에서는 대상 물질인 이산화탄소의 고유 흡수파장에 부합한 1567nm 파장대를 가진 14-pin butterfly type DFB 다이오드 레이저에 대한 특성 분석을 수행하였다. 주입 전류는 20mA에서 225mA까지의 범위에서 5mA간격으로 변화를 주었고, 온도는 10°C에서 65°C까지의 범위에서 10°C씩 변화하였으며, 매 조건에서 10회 반복 측정하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 주입 전류와 온도에 따른 파장의 특성을 나타낸 것으로, 주입 전류와 온도 변화에 따른 출력 특성을 살펴보면 온도가 증가함에 따라 출력은 감소하고, 주입 전류가 증가함에 따라 출력이 증가하는 경향을 나타낸다. 파장 가변의 경향을 살펴보면, 주입 전류와 온도가 증가함에 따라 파장도 동시에 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 주입 전류의 증가 및 온도의 감소에 따라 다이오드 레이저의 p-n 접합면에서의 밴드 간극 에너지

(band gap energy)가 증가되기 때문에 발생한 것으로 이와 같은 결과를 통해 출력과 파장의 상호 특성을 파악함으로써 원활한 계측을 위한 적정 출력과 흡수 파장을 발견할 수 있는 적절한 주사전류와 온도를 설정할 수 있다.

4.2 직접 흡수기법을 통한 CO₂ 계측

직접 흡수기법을 통한 CO₂의 농도 계측을 위해 가스 셀 내의 N₂:CO₂ 조성 비율을 변화시켜 실험을 수행하였다. 주입 전류변화와 TEC를 통한 온도 제어를 통해 R(16)의 전이를 가지는 1572nm 부근의 레이저 광을 얻을 수 있었다.

가스 셀을 통과한 레이저 광은 Fig. 9와 같이 주사전류에 공급한 램프파의 영향으로 인해 발진 파장 변화와 함께 출력의 변화를 수반한다. 또한 가스에 의한 흡수로 인해 램프 신호와 흡수 신호가 중첩된 형태로 Photo-detector에서 계측된다. 러므로 흡수가 일어나지 않은 baseline을 산정하고, 이를 계측된 흡수 신호에서 제거함으로써 흡수 신호를 추출할 수 있다. 이 baseline은 계측된 신호에서 흡수 신호 주위에 존재하는 선형 구간에서의 polynomial fitting(2~3 order)을 통해 얻어질 수 있다.

Figure 10은 주사전류의 가변 폭을 넓게 하여 1572에서 1573 nm 사이의 R(12)~R(16) 흡수 신호를 계측한 결과이다. HITRAN을 통해 산출한 결과와 같이 R(16) 라인에서 가장 강한 흡수 신호가 나타남을 실험적으로 파악할 수 있었으며, 이 결과 R(16) 라인을 계측 대상으로 선택한 것이 높은 신호대 잡음비를 얻기 위한 최적 흡수 라인임을 검증할 수 있다.

Figure 11은 HITRAN 데이터베이스를 통해 얻어진 이론치와 계측된 흡수 신호를 비교한 것으로, HITRAN을 통해 구한 R(16) 라인의 선강

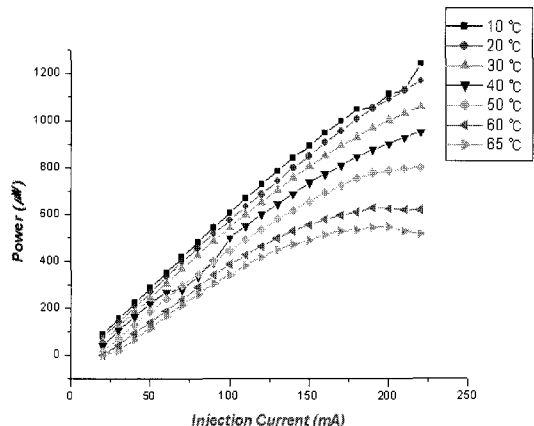


Fig. 7 Output power characteristics of diode laser

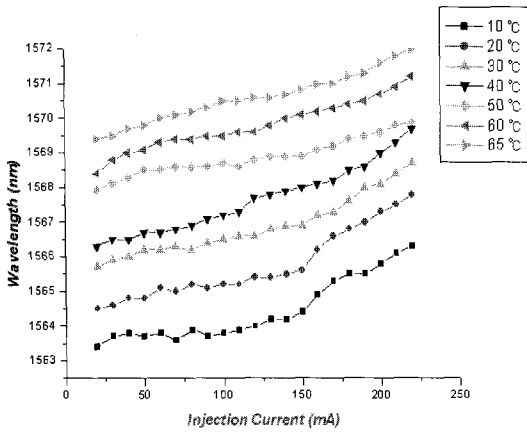


Fig. 8 Wavelength characteristics of diode laser.

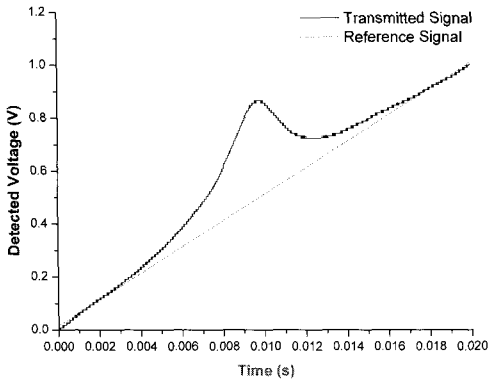


Fig. 9 Sample signal obtained by passing through a gas medium

전체적으로 HITRAN 결과와 측정 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며, 이론치가 측정치에 비해 다소 과대 예측하는 결과는 대상가스 분자간 충돌에 의한 자기선폭확대(self broadening)와 다른 가스와의 상호 충돌에 의한 공기 선폭확대(air broadening)로만 구분하는 HITRAN의 특성상 이론적으로 고려한 선폭 확대의 영향이 실제 발생하는 선폭확대 영향보다 작기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

Figure 12는 측정된 R(16) 흡수 라인의 흡수 신호를 Voigt 함수를 이용하여 curve fitting한 결과와 비교한 것으로 전체적으로 측정된 매우 잘 일치하는 결과를 확인할 수 있다. 도플러 선폭확대(Gaussian Broadening)과 분자 충돌 선폭확대(Lorentzian Broadening)의 영향이 모두 포함된 Voigt 함수를 통해 실제 흡수 신호와 가장

유사한 선형 함수의 모사가 가능함을 확인할 수 있다

Figure 13은 가스 셀 내의 CO_2 농도를 변화시켜가며 R(16) 흡수 신호를 측정한 결과로서, 농도가 증가함에 따라 흡수 신호가 증가함을 파악할 수 있으며, 본 연구에서 적용한 직접흡수 기법을 통해 가스의 농도 변화를 측정할 수 있음을 확인할 수 있다.

그러나 농도가 낮아짐에 따라 구성 광학계에 존재하는 간섭현상이나 기타 영향으로 인한 잡음(noise)의 영향으로 인해 흡수 신호 대 잡음비(SNR)가 감소하는 경향을 파악할 수 있다. 이런 영향으로 인해 본 직접흡수 기법을 통한 최소 측정 한계(minimum detectable limit)가 결정되며, 이런 한계는 multi-pass cell을 통한 레이저 광의 흡수 통과 거리의 증가나 파장 변조 분광법(wavelength modulation spectroscopy)을 이용한 잡음 제거를 통해 측정한계의 개선이 가능하다.

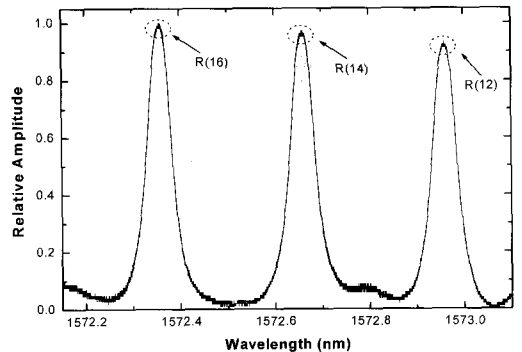


Fig. 10 Measured CO_2 survey spectra from 1572.1-1573.1nm (100% CO_2 , 296K, 1 atm)

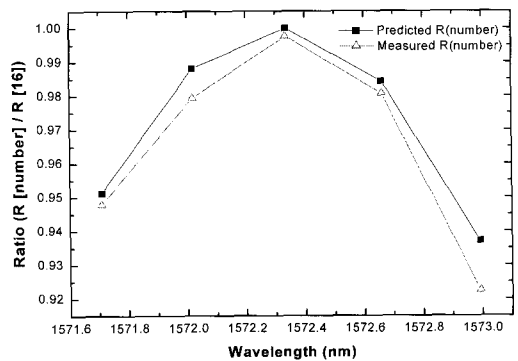


Fig. 11 Comparison of linestrength ratio (100% CO_2 , 296K, 1 atm)

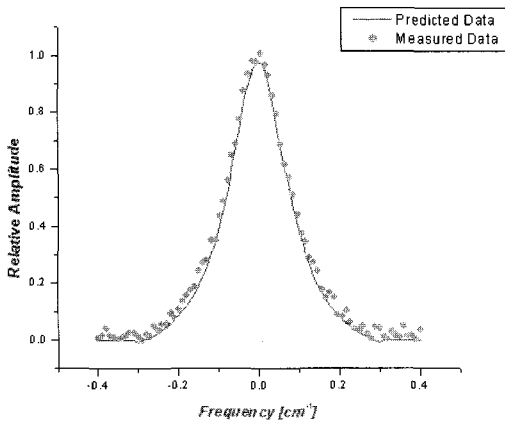


Fig. 12 Comparison of measured and predicted data (HITRAN, 296K, 1 atm)

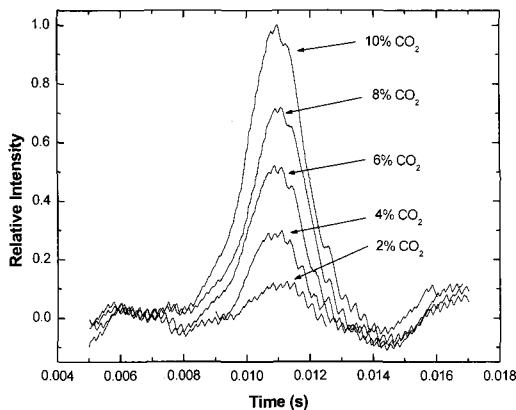


Fig. 13 Comparison of relative absorption signal with different concentration using direct absorption spectroscopy (296K, 1 atm)

5. 결론

본 연구는 DFB 방식의 반도체 다이오드 레이저를 이용한 파장가변 광흡수 계측 기법을 통해 CO_2 가스의 농도 계측이 가능하고, 이를 적용하여 연소 시스템의 배기가스나 화염장 내 대상 가스의 농도 계측을 통한 실시간 연소 진단기술로 적용 가능함을 확인할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다이오드 레이저와 광섬유 기반의 광학계로 구성되고 파장가변 광흡수 계측 기법(TDLAS)을 적용한 농도 계측 시스템을 구축하였으며, 다양한 파장을 가지는 다이오드 레이저를 적용함으로

써 여러 가지 가스의 농도 계측이 가능함을 확인할 수 있다.

2. 다이오드 레이저에 공급하는 주입 전류의 증가에 따라 출력이 증가하고, 파장도 동시에 증가하는 경향을 파악할 수 있었다. 그러나 온도의 증가에 따라 파장은 증가하나, 출력은 줄어드는 경향을 보였다.

3. 계측된 실제 흡수 신호와 분광학적 데이터 베이스인 HITRAN을 통해 얻은 결과를 비교하여, 1570 - 1574nm 사이에서 여러 흡수 신호가 발생함을 확인하였고, 그 중 가장 강한 흡수 신호를 가지는 R(16) 천이를 대상으로 흡수 분광 실험을 수행하였다.

4. 직접 흡수기법을 이용한 이산화탄소 농도의 계측 실험 결과, 농도의 증가에 따라 흡수 신호의 강도가 증가함을 확인할 수 있었으며, 농도가 감소함에 따라 신호대 잡음비가 감소함을 확인할 수 있다. 이와 같은 신호대 잡음비는 시스템의 계측 한계를 결정한다.

5. 향후 실제 연소 시스템의 화염장 내 연소 특성 분석과 배기단에서 배출되는 배기 가스의 정량적인 농도 계측을 통한 연소 진단을 위해서는 다양한 분광학적 변수들의 분석 및 전문적인 계측 기법의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업의 지원을 통한 이산화탄소 저감 및 처리기술개발의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] Allen, M. G., "Diode Laser Absorption Sensors for Gas-Dynamic and Combustion Flows," *Mea. Sci. Technol.* 9, 1998, pp. 545-562.
- [2] Furlong, E. R., Baer, D. S. and Hanson, R. K., "Combustion control using a Multiplexed Diode Laser Sensor System," *Twenty-Sixth Symposium(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1996, pp. 2851-2858.
- [3] Mihalcea, R. M., Baer, D. S. and Hanson, R. K., "A Diode Laser Absorption Sensor Systems for Combustion Emission Measurements," *Meas. Sci. Technol.* 9, 1998, pp. 327-338.
- [4] Mihalcea, R. M., Baer, D. S. and Hanson,

- R. K., "Diode Laser Sensor for Measurements of CO, CO_2 , and CH_4 in Combustion Flows," App. Opt. 36, 1997, pp. 8745-8752.
- [5] Rothman, L. S., "The HITRAN Molecular Database : Editions of 1991 and 1992," J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer 48, 1992, pp. 469-507.
- [6] Hanson, R. K., "Recent Advances in Laser Based Combustion Diagnostics," AIAA 35th Aerospace Sciences Meeting, 1997, pp. 97-115.
- [7] Kimball-Linne, M., Kychakoff, G. and Hanson, R. K., "Fiber Optic Absorption fluorescence Combustion Diagnostics," Comb. Science and Tech. 49, 1986, pp. 307-322.
- [8] Nagali, V., Chou, S. I., Baer, D. S. and Hanson, R. K., "Measurements of H_2O and Temperature in High Pressure Environments Using Near-IR Diode Laser Absorption," AIAA 19th Advanced Measurement and Ground Technology Conf., 1996, pp. 2196-2225.
- [9] Nagali, V. and Hanson, R. K., "Development of a Diode Laser Based Diagnostic to Monitor H_2O in High Pressure Environments," AIAA 35th Aerospace Sciences Meeting, 1997, pp. 2196-2225.
- [10] Upschulte, B. L., Sonnenfroh, D. M., Allen, M. G. and Miller, M. F., "In-situ, Multi-Species Combustion Sensor Using a Multi-Section Diode Laser," AIAA 36th Aerospace Sciences Meeting, January, 1998, pp. 98-102.