

다이오드 레이저를 이용한 연소진단기법

차학주† · 김민수 · 신명철 · 김세원* · 김혁주** · 한재원***

Combustion Diagnostics Method Using Diode Laser Absorption Spectroscopy

Hak-Joo Cha†, Min-Soo Kim, Myung-Chul Shin, Se-Won Kim*,
Hyuck-Joo Kim**, Jae-Won Han***

ABSTRACT

Diode laser absorption system is advantageous of their non-invasive nature, fast response time, high sensitivity and real-time measurement capability. Furthermore, recent advances in room-temperature, near-IR and visible diode laser sources for telecommunication, optical data storage applications are enabling combustion diagnostics system based on diode laser absorption spectroscopy. So, combined with fiber-optics and high sensitive detection strategies, compact and portable sensor system are now appearing for a variety of applications. The objective of this research is to take advantage of distributed feed-back diode laser and develop new gas sensing system. It experimentally found out that the wavelength, power characteristics as a function of injection current and temperature. In addition to direct absorption and wavelength modulation spectroscopy have been demonstrated in these experiments and have a bright prospect to this diode laser system.

Key Words : Diode laser, Combustion diagnostics, DFB(Distributed feed-back), Direct absorption, WMS(Wavelength modulation spectroscopy), Fiber optics, CO₂

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
$g(\nu - \nu_0)$: 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	

1. 서 론

* 한국생산기술연구원

† 연락처자, zeon@kitech.re.kr

** 한국에너지기술연구원

*** 연세대학교 기계공학과

전세계적으로 환경 문제가 사회적 이슈로 크게 부각됨에 따라 공해 물질의 저감 노력이 활발히

진행되고 있는 가운데, 국내에서도 마찬가지로 이에 대한 연구와 노력이 계속되고 있다. 그 중에서도 산업체에서 발생하는 질소 산화물과 같은 배기 가스를 줄이기 위한 방안 중 연소 시스템의 배기단에서 실시간으로 농도와 온도 등을 계측함으로써 최적의 운전 조건을 도출하여 공해 물질을 저감하는 방식이 널리 사용되고 있다. 이러한 계측을 위하여 레이저를 이용한 계측기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나, 기존의 액체 및 기체를 매질로 하는 레이저를 이용한 계측 기술은 대부분 고출력의, 고가인 레이저를 사용해야 하며, 측정값이 직접적으로 얻어지는 것이 아니라 얻어진 자료의 분석이 필요하므로 사용법이 복잡하고, 기기의 특성상 세심한 주의가 요구되는 등 그 한계점을 드러내고 있다.

그리하여, 최근에는 미국과 유럽을 중심으로 광 흡수법에 기초한 반도체 다이오드 레이저 계측 방법이 보편화되고 있는데, 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 관측할 수 있으므로, 연소 시스템의 모니터링에 유용하게 쓰일 수 있다. 하지만, 아직 국내에서는 이에 대한 기술력이 확보되지 않은 상태이고, 현재 사용되고 있는 거의 모든 연소 계측 시스템을 외국에 의존하고 있는 실정이다.

따라서, 광 흡수법과 파장 가변을 적용한 반도체 다이오드 레이저를 이용하여 연소 시스템에서 발생하는 질소 산화물을 비롯한 유해 물질의 실시간 계측 시스템의 개발이 절실히 요구된다.

연소 시스템에서 발생하는 다양한 종류의 배기 가스는 각각 고유한 흡수 파장대를 가지고 있다 (CO_2 : 1.57 μm , O_2 : 0.76 μm , NO : 1.8 μm , NO_2 : 0.67 μm 등). 이를 기반으로, 다이오드 레이저 광계측 시스템은 계측하고자 하는 대상 가스의 고유 흡수 파장을 가지는 레이저를 조사하고 이 중 흡수되는 양을 측정하는 비교적 간단한 비접촉식 광계측 기법을 이용하여 일반 계측기로는 계측이 불가능한 중간 생성물 및 함불소 화합물과 같은 희귀 가스의 계측까지 가능할 뿐만 아니라, 수 천 ppm에서 수 ppb까지의 정밀 계측이 가능하다. 그리고, 가시광 영역에서 적외선 영역까지 광범위한 파장 영역대를 가변화할 수 있으며, 규칙적이고 안정한 출력값을 얻을 수가 있다.

본 연구에서는 DFB(Distributed Feed-Back) 방식의 파장 가변형 다이오드 레이저를 이용하여 지구 온난화 현상을 유발하는 주요 물질중의 하나인 이산화탄소를 대상으로 정성적인 농도 계측 실험을 하였으며, reference gas cell을 이용하여 주입 전류와 온도의 변화에 따른 다이오드 레이

저의 출력 및 파장 특성과 레이저 고유 특성 분석 실험을 수행하였다. 또한, direct absorption 기법과 wavelength modulation spectroscopy 기법의 다변화된 계측 기술을 통해 다양한 유해 물질 계측의 가능성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Direct Absorption Method

다이오드 레이저를 이용한 다양한 계측 기법 중 직접 흡수기법(Direct Absorption Method)을 이용한 대상 물질의 농도 계측에 필요한 관련 이론 및 수식을 정리하면 다음과 같다.

2.1.1 Beer-Lambert Relation

다이오드 레이저를 이용한 광계측 시스템은 대상 가스가 분포하는 측정 거리에 따라 전파하는 광원의 파장 가변된 레이저 강도의 흡수 변화에 기반을 둔다. 일반적으로 연소 및 유동 진단에 이용되는 LIF(Laser-Induced Fluorescence)나 coherent scattering 및 기타 다른 기술과 비교할 때, 상대적으로 용이하게 대상 물질의 농도를 정성, 정량적으로 계측할 수 있다. 대상 물질의 흡수 강도는 다음과 같이 Beer-Lambert 식에 의해 나타낼 수 있다.

$$I_{\nu} = I_{\nu,0} \exp[-S(T)g(\nu-\nu_0)Nl] \quad (1)$$

$S(T)$ 는 온도에 의존하는 함수이고, $g(\nu-\nu_0)$ 는 온도와 압력에 따라 변화는 함수이다. $S(T)$ 의 온도 의존성은 흡수되는 성분의 내부 에너지 준위 분포에 따른 Boltzmann 분포 통계에 근거한다. 작은 분자의 적외선 영역대(IR) 전위(transition)는 가장 보편적으로 광범위하게 사용되는 HITRAN을 이용하여 산출한다. $g(\nu-\nu_0)$ 는 분자의 전위 주파수가 충돌(collision)에 의해 선평(line-width)이 넓어지는 효과를 Lorentzian profile로 나타내고, doppler에 의해 선평이 넓어지는 효과를 Gaussian profile로 나타낸다. 하지만 일반적으로 line-shape function은 이 두 효과를 조합한 Voigt profile을 사용한다. 어떤 임의의 온도에서 $S(T)$ 는 다음 식에 의해 나타낼 수 있다.

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[\frac{1 - \exp(hcE/kT)}{1 - \exp(hcE/kT_0)}\right] \quad (2)$$

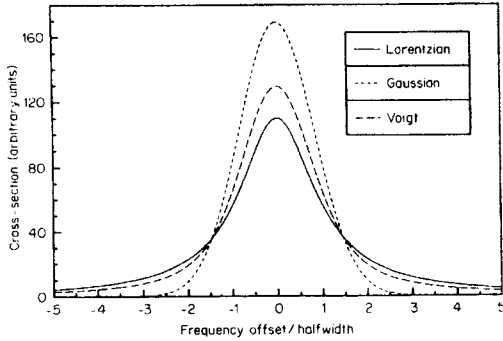


Fig. 1 Lorentzian, Gaussian, and Voigt line-shapes. All are for the same value of S and HWHM. The Voigt profile corresponds to the pressure at which

Fig. 1은 동일한 line-strength와 HWHM(half width and half maximum)을 가지는 Lorentzian, Gaussian profile 및 이를 조합한 $\gamma_L = \gamma_D$ 일 때의 Voigt profile을 나타낸다.

2.2 Wavelength Modulation Spectroscopy

WMS(wavelength modulation spectroscopy)는 다이오드 레이저 광원에 50 kHz정도의 변조 주파수를 걸어 주어 수광부에서 증폭된 first(1f) 또는 second(2f) 조화 신호를 통해 대상 물질의 농도 및 온도 변수값들을 도출해내는 광측정 기법으로서, 직접 흡수기법에 비해 좁은 선폭을 가지고, 높은 SNR(signal to noise)값을 얻을 수 있으며, 상대적으로 감도(sensitivity)를 높일 수 있어 측정 정밀도를 증대시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 대상 물질의 측정 영역을 통과한 신호에서 얻은 dc 성분 중 추출한 2f 신호를 통해 noise를 효과적으로 제거할 수 있고, 광원의 동요에 의한 효과를 보정할 수가 있다. WMS 기법과 관련한 이론 및 수식을 나타내면 다음과 같다.

2.1.1 WMS 관계식

레이저 주파수 ν 를 변조 크기가 m 인 주파수 Ω 로 변조시켰을 때, 대상 물질의 측정 영역을 통과한 흡수 강도(I_T)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_T(\nu) = I_T(\nu + m \sin \Omega t) \quad (3)$$

이 식을 Taylor 급수로 전개하면,

$$I_T(\nu + m \sin \Omega t) = I_T(\nu) + (m \sin \Omega t) \frac{dI_T}{d\nu} + \left(\frac{m^2 \sin^2 \Omega t}{2!} \right) \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \left(\frac{m^3 \sin^3 \Omega t}{3!} \right) \frac{d^3 I_T}{d\nu^3} + \dots \quad (4)$$

이고, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_T(\nu + m \sin \Omega t) = [I_T(\nu) + \frac{m^2}{4} \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \dots] + \sin \Omega t [m \frac{dI_T}{d\nu} + \frac{m^2}{8} \frac{d^3 I_T}{d\nu^3} + \dots] + \cos 2\Omega t [-\frac{m^2}{4} \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \dots] + \dots \quad (5)$$

이 식에서 볼 수 있듯이, I_T 는 DC 성분, 1f, 2f 등 조화 신호들의 합으로 나타낼 수 있다. Lock-in amplifier를 이용하여 $\cos 2\Omega t$ 성분을 추출하였을 경우, m 이 작다고 가정하면 이 신호는 흡수 강도의 m 증폭된 2차 도함수(second derivative)를 의미하며, 이 신호를 통해 농도 및 온도 변수값들을 유출해낼 수 있다.

2.1.2 CO₂ 농도 관계식

WMS를 통한 CO₂의 농도 측정에서 분자의 전위 주파수가 충돌에 의해 넓어진다고 가정하면 Lorentzian absorption line-shape에 의한 분자의 column density(XL)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$XL \propto \frac{P_{2f} \Delta \nu}{I_0 S} \left[\frac{2}{m^2} \left(\frac{2 + m^2}{(1 + m^2)^{1/2}} - 2 \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

이 식에서 측정된 column density는 온도 함수인 line-strength와 line-width에 따라 변하게 된다. 따라서, 선형적인 결과를 도출하기 위해서는 온도에 대한 영향을 고려해야 한다. 그러기 위해서 기준 온도와 임의 온도일 때의 비율을 이용하여 온도의 영향을 최소화할 수 있는데, CO₂의 column density가 두 전위 i 와 j 에 의해 측정된다고 하면, 이것의 선형적인 조합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[CO_2]_{meas} = a[CO_2]_i + b[CO_2]_j$$

$$= [CO_2][aS_i(T)/S_i(T_{ref}) + bS_j(T)/S_j(T_{ref})] \tag{7}$$

여기서, a와 b는 $a + b = 1$ 를 만족하는 상수이고, $S_k(T_{ref})$ 는 기준 온도일 때의 line-strength를 나타낸다. 따라서, line-shape function을 동시에 고려한 CO₂의 농도에 대한 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[CO_2]_{meas} = [CO_2][a[S_i(T)/S_i(T_{ref})] \times \Delta \nu_i(T_{ref})/\Delta \nu_i(T) + b[\Delta S_j(T)/S_j(T_{ref})] \times \Delta \nu_j(T_{ref})/\Delta \nu_j(T)] \tag{8}$$

이 식에서 볼 수 있듯이, CO₂의 line-strength와 line-width를 기준 온도와 임의 온도에서의 비로 나타냄으로써, 이러한 분광학적 변수들의 온도 영향을 최소화할 수 있어 보다 정확한 농도치를 계산해낼 수 있다.

2.1.3 WMS 관련 이론

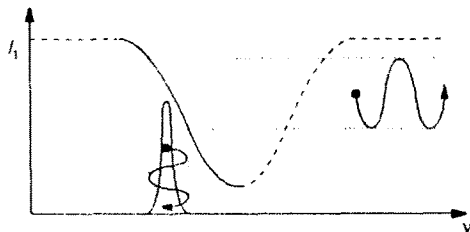


Fig. 2 The Modulation Frequency Before Absorbing Resonance Frequency

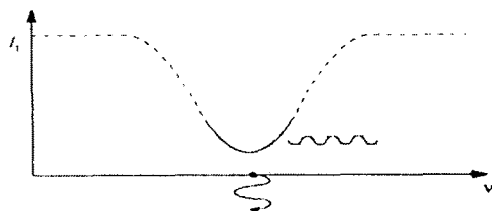


Fig. 3 The Modulation Frequency Same As Absorbing Resonance Frequency

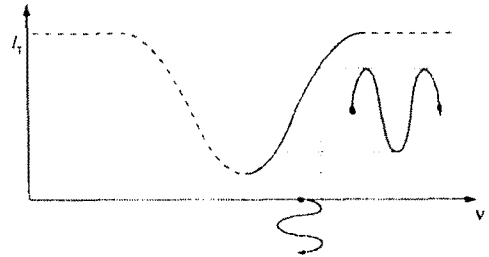


Fig. 4 The Modulation Frequency After Absorbing Resonance Frequency

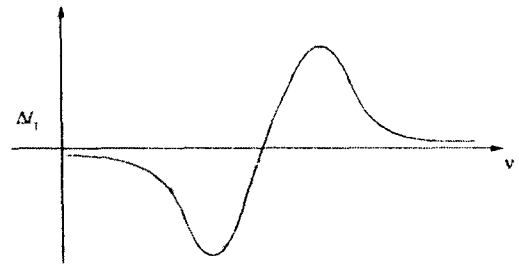


Fig. 5 The Absorption Intensity(I_T) Change of Modulation Frequency as a function of frequency ν

Fig. 2에서 보는 바와 같이 직접 흡수기법에 의해 측정 영역을 통과한 흡수 강도는 기준 신호와 통과한 신호와의 차이에 의해 레이저가 대상 물질을 흡수한 양만큼 shift된다. WMS 기법의 경우, Fig. 2, 3, 4에서 볼 수 있듯이, 다이오드 레이저의 주입 전류에 흡수되는 주파수보다 적은 수십 kHz의 변조 주파수를 걸어주면, 공진 주파수의 흡수 전, 후로 위상이 변화하게 되는데, 변조된 파장이 Fig. 5에서 보는 바와 같이 진폭을 변조시키게 된다. 수광부에서 검출된 신호를 lock-in amplifier에서 특정 신호를 증폭하여 출력된 1f, 2f 조화 신호를 통하여 RAM(residual amplitude modulation), 레이저 과잉 잡음(laser excess noise) 및 shot 잡음과 같은 레이저와 주파수의 고유 잡음을 효과적으로 제거하여 측정된 신호에 잡음이 함유된 직접 흡수기법과 달리 WMS 기법은 상대적으로 높은 감도를 얻을 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 표준 가스 셀 시스템

다이오드 레이저의 특성 분석과 이산화탄소의

정성적인 계측을 위해, Fig. 6에서 보는 바와 같이 reference gas cell 시스템을 구성하였다. Cell은 레이저 빔을 통과시키기 위해 양단 끝부분의 중심부에 지름 50mm의 고 투과율을 가진 Quartz를 45° 각도로 부착시켰으며, 흡수 길이가 700 mm인 일정 용량을 가지도록 정밀 제작하였고, 빔의 내부 반사를 방지하기 위하여 cell 내부 착색을 하였다. 이산화탄소 유량 제어는 Micro-manometer의 차압을 이용하여 조절하며, 압력에 의해 선폭이 넓어지는 것을 방지하기 위한 목적으로, 대기압보다 낮은 압력을 유지하기 위해 cell 출구단에 진공 펌프를 설치하였다. 실험에 사용된 가스는 99.999 %의 고순도를 가진 standard CO_2 와 purge용 N_2 를 사용하였다. 그리고 대상 가스의 온도 계측을 위해 cell의 중심부 상단에 R-type 열전대를 사용하여 실험을 수행하였다.

3.2 다이오드 레이저 광계측 시스템

다이오드 레이저 광계측 시스템은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 크게 레이저 발진부, 광섬유 연결부, 수광부의 3부분으로 구성된다. 발진부는 다시 다이오드 레이저 컨트롤러와 마운트, 신호 발생기 및 레이저 element(source)로 구분되어진다. 다이오드 레이저 컨트롤러는 조사되는 레이저의 파장을 변화시켜 주기 위해 가장 보편적으로 사용되는 DFB 방식(Distributed Feed-Back)을 채택하였으며, 이는 광원에 정밀하고 일정한 주입 전류와 온도를 유지, 변화시켜준다. 마운트는 10 k Ω thermistor가 부착되어 다이오드 레이저 source의 온도를 감지하고, 내부의 양단에 진열판이 부착되어 필요한 온도로 조절되어진다. 신호 발생기는 주파수 변조에 필요한 50 kHz 정도의 주파수 파형을 걸어주기 위해 사용되었다.

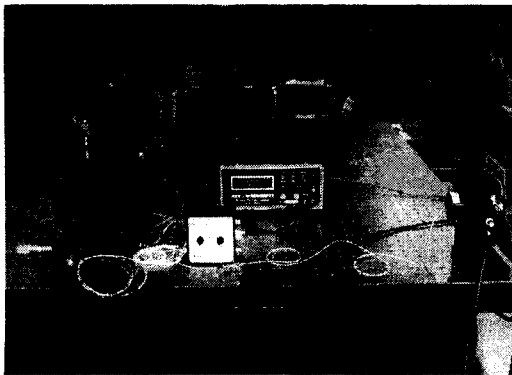


Fig. 6 Picture of Reference Gas Cell System

WMS 기법의 경우, 이 컨트롤러의 변조 단자에 신호 발생기로부터 주파수를 걸어주어 실험을 수행하였다. 광원으로는 이산화탄소의 고유 흡수 파장인 1.57 μm 에 적합한 근적외선 영역대 20 mW, 1570 nm의 출력과 파장을 가지는 SM(single mode) type의 14-pin butterfly 다이오드 레이저 source를 사용하였으며, 광학 장치들의 정렬(alignment)을 위해 가시광 영역대 5 mW, 635 nm의 출력과 파장을 가지는 pigtailed type의 element를 적용하였다.

광섬유 연결부는 광 부품 정렬의 편리성 및 현장 적용에 용이한 광섬유(optical fiber) 방식을 채택하였으며, 이는 isolator, collimator, coupler, connector로 구성되고, FC/APC type으로 이루어진다. Coupler는 isolator에서 나온 빔을 기준 신호(reference signal)와 통과 신호(transmitted signal)로 분기시켜 주기 위해 사용되었으며, 다양한 광원을 하나로 집중시키는 데에도 이용된다. Isolator는 최초 다이오드 레이저 source로부터 연결되어, 광원의 역 반사(back-reflection)에 취약한 element를 보호하기 위해 사용하였다. Collimator는 빔의 직진성을 유지시켜 주기 위한 collimating lens와 커넥터로 구성되어 있으며, cell 양단에 빔을 발진하고 검출하기 위해 사용되었다. 여기서, collimating lens는 마이크로미터가 부착된 translation stage를 이용하여 X, Y, Z의 3축 방향으로 위치를 조절하고, goniometer를 통해 상하, 좌우 방향의 각도 변화를 주어 정렬시킨다.

수광부는 auto-balanced photo-receiver, dual phase lock-in amplifier, oscilloscope, DAQ 시스템으로 구성된다. Auto-balanced photo-receiver는 기준 신호와 cell을 지난 통과 신호를 동시에 받아들여, 내부의 PD(photo-diode)를 통해 빔을

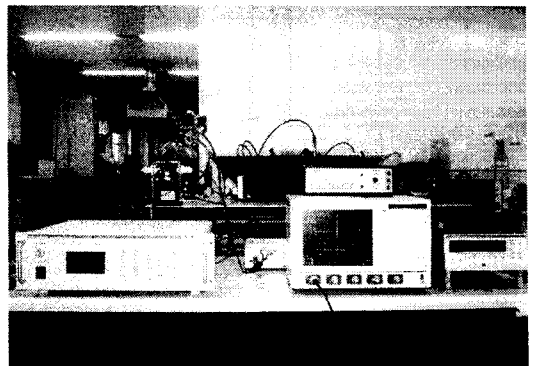


Fig. 7 Picture of Diode Laser Absorption Spectroscopy System

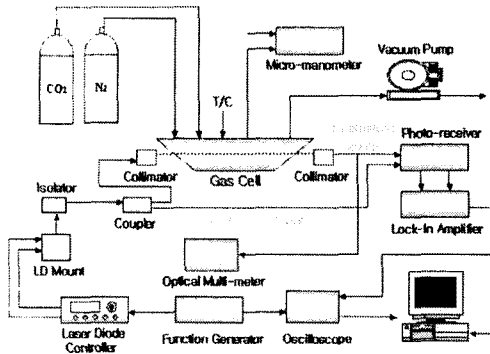


Fig. 8 Schematic Diagram of Experimental Set Up

검출하기 위하여 사용되었다. 여기서, 검출된 신호는 증폭되어 지며, 직접 흡수기법에서는 이 증폭된 신호가 오실로스코프를 통해 GPIB interface 보드로 연결된 DAQ 장치로 보내져 신호 분석을 한다. WMS 기법의 경우, receiver에서 증폭된 신호가 dual phase lock-in amplifier로 들어가 1f 나 2f 조화 신호로 추출되어 증폭하게 된다. Fig. 8은 다이오드 레이저 계측 시스템의 장치 개념도를 나타낸다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 주입 전류와 온도 변화에 따른 출력 및 파장 특성

본 연구에 적용된 DFB 방식 다이오드 레이저의 특성을 고찰하기 위하여, 대상 물질인 이산화탄소의 고유 흡수파장에 부합한 1570 nm 파장을 가진 14-pin butterfly type 다이오드 레이저 source에 대한 특성 분석을 수행하였다. CO₂의 흡수 스펙트럼을 얻기 위해서는 다이오드 레이저 컨트롤러를 통한 주입 전류와 온도의 조절을 통해 파장을 가변시켜 흡수 파장 영역대를 포착해야 하므로, 주입 전류와 온도에 따라 출력 및 파장이 어떤 분포를 가지는지에 대한 연구가 선행되어야 한다. Fig. 9는 주입 전류와 온도에 따른 파장의 특성을 3차원 맵으로 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 1570.3 nm에서 1577.5 nm까지 파장이 가변되는 것을 볼 수가 있다. 주입 전류는 50 mA에서 150 mA까지의 범위에서

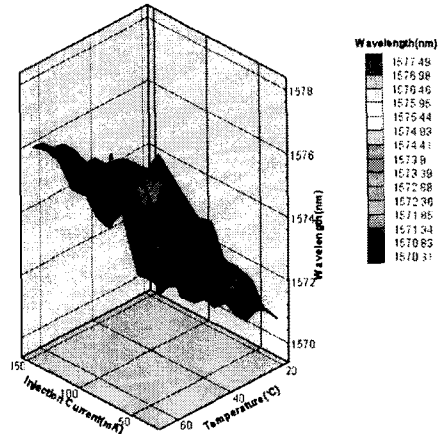


Fig. 9 The Wavelength Characteristics of Diode Laser as a Function of Injection Current & Temperature

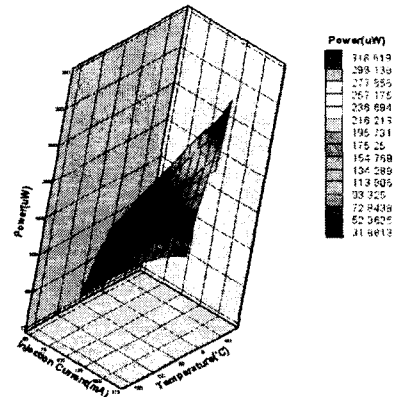


Fig. 10 The Power Characteristics of Diode Laser as a Function of Injection Current & Temperature

5 mA씩 변화를 주었고, 온도는 20°C에서 75°C까지의 범위에서 2°C씩 제어하였으며, 3회 반복 측정하였다. 파장 가변의 경향을 살펴보면, 주입 전류와 온도가 증가함에 따라 파장도 동시에 증가하는 경향을 나타낸다. 분석한 맵 데이터를 통해 이산화탄소의 고유 흡수파장 영역대를 선정하였다. Fig. 10은 주입 전류와 온도에 따른 출력의 특성을 3차원 맵으로 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 출력은 감소하고, 주입 전류가 증가함에 따라 출력이 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서, 출력과 파장의 상호 특성을 고려하여 적절한 전류와 온도를 제어할 필요가 있다.

4.2 직접 흡수기법과 WMS 기법을 통한 이산화탄소 계측 실험

직접 흡수기법을 통한 이산화탄소 농도의 계측을 위해 차압계를 이용하여 gas cell에 $N_2:CO_2$ 의 조성 비율을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. Fig. 11은 $N_2:CO_2 = 9:1$ 비율로 농도를 조성하였을 때, 이산화탄소의 농도를 계측한 스펙트럼이다. 그림에서 보는 바와 같이, 10% CO_2 농도를 나타내는 peak 신호가 농도가 감소함에 따라 점차 줄어드는 것을 알 수가 있다.

WMS 기법을 통한 실험에서는 다이오드 레이저 컨트롤러에 50 kHz의 sine 변조 주파수를 걸어주어 기준 신호와 cell을 지난 통과 신호를 auto balanced photo-receiver로 주입하여 그 차이를 증폭($\times 10$)하여 나온 출력 신호를 오실로스코프로 계측하였다. Fig. 12, 13은 직접 흡수기법과 WMS 기법을 적용하였을 경우의 peak 신호와 $2f$ 조화 신호를 나타내는 것으로, 그림에서 보듯이 $2f$ 신호가 상대적으로 신호 세기는 약하지만, 잡음이 제거되어 높은 감도를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 따라서, 본 실험의 결과를 토대로 신호 발생기를 이용하여 변조 주파수를 걸어주었을 때, 원래 신호와의 비교, 분석을 통해서 WMS의 가능성을 확인할 수 있었다. Fig. 15는 HITRAN을 이용하여 온도가 500 K인 경우의 CO , CO_2 , H_2O 의 주파수 변화에 따른 line-strength의 변화를 나타내는 것으로, 기존의 NDIR(non-dispersive infrared) 장치는 적외선 영역대의 fundamental band에서 대상 물질을 계측하기 때문에, H_2O 의 간섭에 의해 측정 신호에 잡음이 많이 포함되어 측정 오차가 커지는 단점을 가지고 있다. 하지만 다이오드 레이저는 근적외선 영역인 second overtone band에서 계측을 하기 때문에 H_2O 에 의한 영향을 최소화할 수가 있어 계측 정밀도를 높일 수가 있다. Fig. 16은 압력 1기압, 온도가 1500K일 때, HITRAN에서 구한 주파수 변화에 따른 10% CO_2 와 H_2O 의 흡수를 변화에 따른 스펙트럼을 나타내는 것으로, H_2O 의 간섭 영향을 최소화하는 최적 R(number)값을 도출해낼 수 있다. 따라서, 계측하고자 하는 대상 물질의 정량적인 계측을 위해서는 HITRAN을 이용한 분광학적 변수들의 최적화된 정보를 구해야 한다.

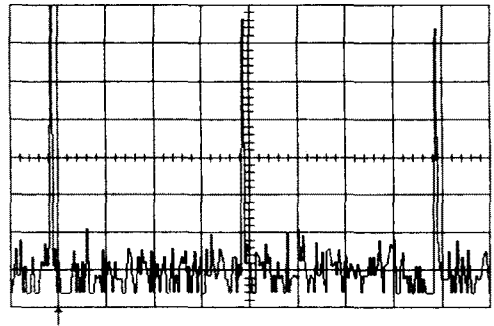


Fig. 11 The Spectrum of CO_2 Peak Signal ($N_2:CO_2 = 9:1$)

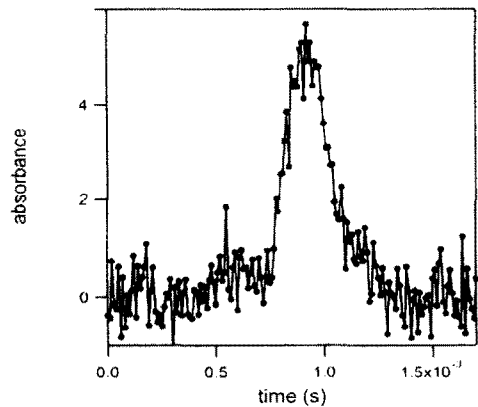


Fig. 12 The Line-shape recorded using Direct Absorption Method

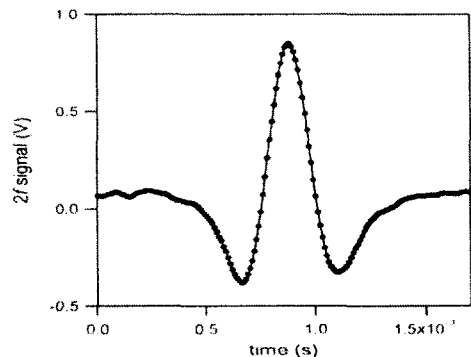


Fig. 13 The Line-shape recorded using WMS Method

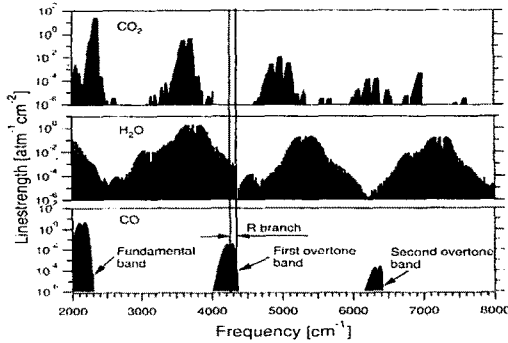


Fig. 14 Survey spectra of CO and major combustion products H₂O and CO₂ at 500K based on HITRAN database

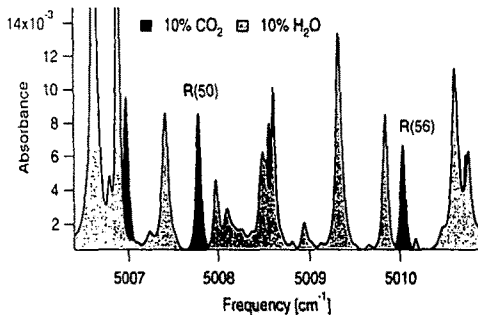


Fig. 15 Calculated spectra of 10% CO₂ and 10% H₂O at combustion conditions (P=1atm, T=1500K)

5. 결론

본 연구는 연소 진단에 적용되는 기존의 액체 및 기체를 매질로 하는 레이저를 대체할 신기술 중 DFB 방식의 반도체 다이오드 레이저를 이용하여 연소 시스템의 배기단과 화염장 내 대상 가스의 농도 계측을 통한 실시간 연소 진단기술의 적용 가능성을 검토해 보았다.

아울러, reference gas cell을 이용하여 이산화탄소를 대상으로 다이오드 레이저 특성 분석 및 직접 흡수기법과 WMS 기법의 적용을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다이오드 레이저 광원에 걸어주는 주입 전류의 증가에 따라 출력이 증가하고, 파장도 동시에 증가하는 경향을 보였다. 그리고, 온도의 증가에 따라 파장은 증가하나, 출력은 줄어드는 경향을 보였다. 따라서 이산화탄소의 최적 흡수 파장 영역대를 선정하기 위해서는 주입 전류와 온도를

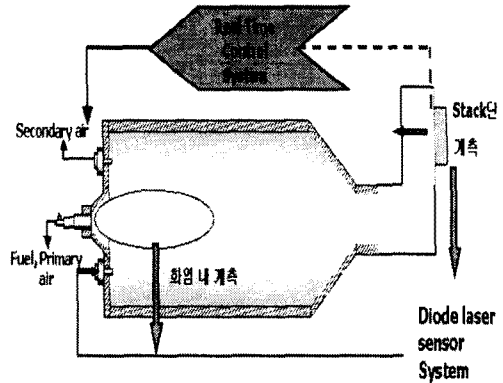


Fig. 16 The Combustion Diagnostics Application of Diode Laser System

출력이 감소하지 않는 범위에서 일정한 파장을 얻기 위해 정밀하게 조절할 필요가 있다.

2. 직접 흡수기법을 이용하여 이산화탄소 농도의 계측 실험 결과, peak 신호가 농도에 따라 변화하는 것을 정성적으로 확인할 수 있었다. 그리고, 직접 흡수기법과 WMS 기법을 통한 실험에서 변조 주파수를 걸어주어 얻은 데이터를 통해 계측 가능성을 확인할 수 있었다.

3. Gas cell을 통한 대상 물질의 정성적 계측 실험을 통하여, 실 연소 시스템에서 화염장 내 연소 특성 분석과 배기단에서 배출되는 배기 가스의 농도 계측을 통한 연소 진단의 가능성을 확인할 수 있었다. 하지만, 고온 영역대에서 온도에 의해 선편이 넓어지고 주위 다른 물질의 복사에 의한 잡음 등이 발생하기 때문에 향후 온도와 압력의 변화에 따른 분광학적 변수들의 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 다이오드 레이저 컨트롤러 모듈(module)의 추가 장착과 TDM(time-division-multiplexing)을 통해 하나의 검출기와 단일 회로로 가시광 영역에서 적외선 영역에 이르기까지 광범위한 영역대에서 계측 대상 물질을 동시 계측할 수가 있음을 확인하였다. 그리고, 정량적 분석을 위해서는, HITRAN을 이용하여 대상 물질의 분광학적 변수를 도출하여 실 계측에서 얻은 자료와 비교, 분석을 통한 최적화된 정보를 구축하여야 한다.

후기

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구 개발사업의 지원을 통한 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] M. G. Allen, "Diode Laser Absorption Sensors for Gas-Dynamic and Combustion Flows," *Mea. Sci. Technol.* 9, 1998, pp. 545-562.
- [2] E. R. Furlong, D. S. Baer, and R. K. Hanson, "Combustion control using a Multiplexed Diode Laser Sensor System," Twenty-Sixth Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1996, pp. 2851-2858.
- [3] R. M. Mihalcea, D. S. Baer, and R. K. Hanson, "A Diode Laser Absorption Sensor Systems for Combustion Emission Measurements," *Meas. Sci. Technol.* 9, 1998, pp. 327-338.
- [4] M. Gabrysch, C. Corsi, F.S. Pavone, and M. Inguscio, "Simultaneous Detection of CO and CO_2 using a semiconductor DFB diode laser at 1.578 μm ," *App. Phys. B.* 65, 1997, pp. 75-79.
- [5] B. L. Upschulte, D. M. Sonnenfroh, M. G. Allen, and M.F. Miller, "In-situ, Multi-Species Combustion Sensor Using a Multi-Section Diode Laser," AIAA 36th Aerospace Sciences Meeting, January, 1998, pp. 98-102.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Philippe, L. C. and Hanson, R. K., "Laser Diode Wavelength Modulation Spectroscopy for Simultaneous Measurement of Temperature, Pressure, and Velocity in Shock Heated Oxygen Flows," *App. Opt.* 32, 1993, pp. 6090-6103.
- [12] Rothman, L. S., "The HITRAN Molecular Database : Editions of 1991 and 1992," *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer* 48, 1992, pp. 469-507.
- [13] H. J. Cha, M. C. Shin, and S. W. Kim, "Development of Flame Measurement and Diagnostic Techniques in High Temperature Oxygen-Combustion System," First Carbon Dioxide Reduction & Sequestration Technology Workshop, April, 2003.