

파장변조 광흡수 분광법을 이용한 농도 계측 기법

Species Concentration Measurement Technique Using Wavelength Modulation Absorption Spectroscopy

안재현*, 김용모*

J. H. Ahn, Y. M. 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 new gas sensing system and to verify feasibility of this system. Wavelength modulation spectroscopy has been demonstrated in these experiments and has a bright prospect to this diode laser system.

주요기술용어 : Absorption Spectroscopy(흡수 분광법), Wavelength Modulation(파장변조), Diode Laser(다이오드 레이저), Fiber optics(광섬유), Harmonic signal(조화신호)

1. 서론

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.

최근 광통신 분야의 발전으로 인해, 다양한 파장의 다이오드 레이저 개발됨에 따라 이를 이용한 광 흡수법에 대한 연구가 미국과 유럽의 선진국을 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 연소 가스는 Table 1에서 보는 바와 같이 각각

* 한양대학교 대학원

** 한양대학교 기계공학부

고유 흡수 파장 영역을 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 불가능한 중간 생성물 및 희귀 가스의 계측까지 가능하다. 또한 시스템 구성에 따라 수 천 ppm에서 수 ppb까지의 넓은 범위의 계측 정밀도 조정이 가능하다.

본 연구에서는 파장 변수가 가능한 다이오드 레이저를 이용하여 광흡수 분광법(Absorption Spectroscopy) 중 하나인 파장변조 흡수 분광법(wavelength modulation spectroscopy) 시스템을 구축하고 이를 바탕으로 주요 연소생성물 중 하나인 이산화탄소를 대상으로 농도 계측을 수행하였다. 또한 분광학적 데이터베이스를 이용하여 얻은 분광학적 변수 산출 및 이산화탄소의 흡수 특성을 통해 계측의 가능성을 검증하였다.

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

2. 이론적 배경

2.1 흡수 분광법(Absorption Spectroscopy)

특정 기체에 의해 이루어지는 광 흡수의 분광학적 특성은 식(1)과 같이 Beer-Lambert 관계식에 의해 나타낼 수 있다. 대상 기체 통과 전의 빛의 강도에 대한 통과 후의 강도의 비로 정의 되는 투과율은 대상 기체 분자의 수 밀도(N)와 통과거리(L), 그리고 흡수의 분광학적 특성인자인 선강도(linestrength)와 선형상

함수(lineshape function)의 지수함수 형태로 표시된다. (1),(2)

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

여기서, $S(T)$ 는 선강도(line strength)를 나타내며, 이는 온도에 의존하는 함수이고, Φ 는 선형상 함수(lineshape function)로서 온도와 압력에 따라 변화하는 함수이다. 어떤 임의의 온도에서의 선강도 $S(T)$ 는 기준 온도에서의 $S(T_0)$ 와 다음 관계식에 의해 나타낼 수 있다.

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

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

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

선형상 함수 Φ 는 분자의 진이 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 정량화되어진다. (4)

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

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 선포는 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.

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

온도 계수인 N 은 일반적으로 1보다 적기 때문에 충돌 선포확대는 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 전술한 두 가지 선포확대의 역 상관관계(convolution)로 정의되는 Voigt profile를 사용한다.

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

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 선포 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.

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

Fig. 1은 Lorentzian, Gaussian 선형상 함수 및 동일 선포에서의 Voigt 선형상 함수를 비교하여 나타낸 것이다.

2.1 파장변조 분광법

파장변조 분광법(wavelength modulation spectroscopy)은 다이오드 레이저에 공급하는 전류를 수~수십kHz 정도의 주파수로 변조하여 주사하고, 변조된 레이저 빔을 대상 기체에 통과, 이를 계속하여 신호 중에 포함된 1차 조화(first harmonic) 또는 2차 조화(second harmonic) 신호를 통해 가스에 의한 광 흡수를 도출해내는 광계측 기법이다.

Fig. 2 (a)~(c)에서 보는 바와 같이 가스 분자에 의한 흡수 밴드를 포함하는 파장 영역으로 레이저 빔의 파장이 변화하면서, 흡수 선포보다 작은 선포의 파장 변조 주파수를 가지는 레이저 빔이 조사되면, 가스 통과 후의 레이저 빔은 중심 흡수 파장을 기점으로 흡수 강도에 따라 Fig. 2(d)와 같이 흡수 신호의 1차 도함수 형태와 동일한 진폭의 변화를 이루게 된다. 이런 특징으로 인해 파장변조 분광법은 도함수 분광법(derivative spectroscopy)이라고 불려지기도 한다. 이와 관련한 자세한 이론 및 수식을 나타내면 다음과 같다

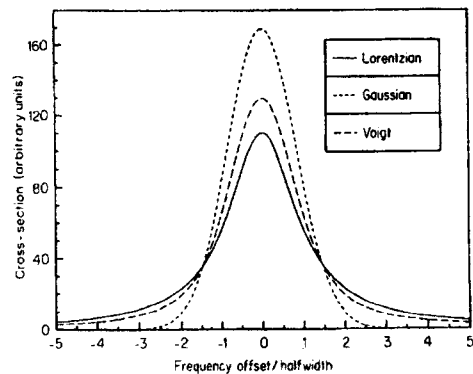


Fig. 1 Lorentzian, Gaussian, and Voigt line-shapes($\Delta\nu_D = \Delta\nu_C$)

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

$$I_T(\nu) = I_T(\nu + a \sin \Omega t) \quad (12)$$

이 식을 Taylor 급수로 전개하면,

$$I_T(\nu + a \sin \Omega t) = I_T(\nu) + (a \sin \Omega t) \frac{dI_T}{d\nu} + \left(\frac{-a^2 \sin^2 \Omega t}{2!} \right) \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \left(\frac{a^3 \sin^3 \Omega t}{3!} \right) \frac{d^3 I_T}{d\nu^3} + \dots \quad (13)$$

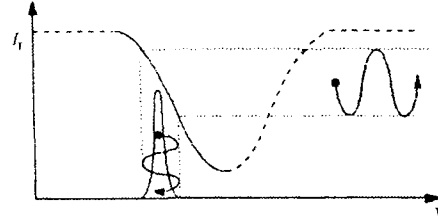
이고, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_T(\nu + a \sin \Omega t) = \left[I_T(\nu) + \frac{a^2}{4} \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \dots \right] + \sin \Omega t \left[a \frac{dI_T}{d\nu} + \frac{a^2}{8} \frac{d^3 I_T}{d\nu^3} + \dots \right] + \cos 2\Omega t \left[-\frac{a^2}{4} \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \dots \right] + \dots \quad (14)$$

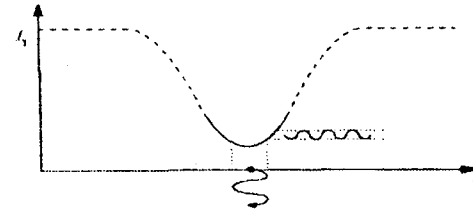
위 식(14)에서 볼 수 있듯이, 투과 후 강도 I_T 는 직류 성분, 1차, 2차 등 조화 신호들의 합으로 나타낼 수 있다. 이 신호들 중에서 Lock-in amplifier를 이용하여 $\cos 2\Omega t$ 성분을 추출하고, m 이 충분히 작다고 가정하면 이 신호는 흡수 강도의 2차 도함수(second derivative)를 의미하며, WMS를 통한 농도 계측에 있어서 가스 분자간 충돌에 의한 선폭확대(Lorentzian broadening)가 지배적이라고 가정한다면 흡수에 의한 분자의 column density(XL)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$XL \propto \frac{P \Delta \nu}{I_0 S} H_2(x, m) \quad (15)$$

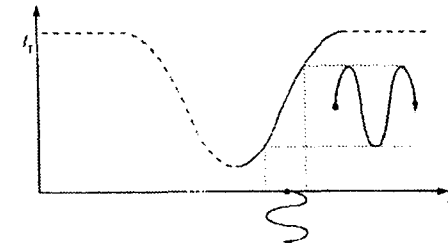
여기서, $H_2(x, m)$ 는 2차 조화파의 푸리에 계수를 의미하며, x 와 m 은 각각 다음과 같이 무차원화 되어 정의된다.



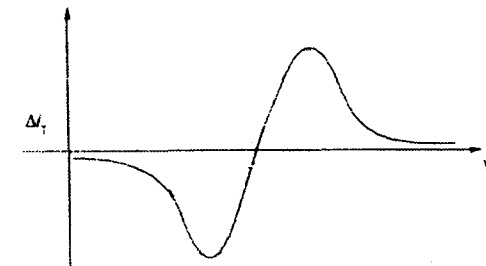
(a) Transmitted signal before absorbing resonance frequency



(b) Transmitted signal near absorbing resonance frequency



(c) Transmitted signal after absorbing resonance frequency



(d) Absorption intensity(I_T) change as a function of frequency ν

Fig. 2 Principle of wavelength modulation spectroscopy.

$$x = \frac{\bar{\nu} - \nu_0 - \Delta\nu_s}{\Delta\nu_c/2} \quad (16)$$

$$m = \frac{a}{\Delta\nu_c/2} \quad (17)$$

m 으로 정의된 변조지수(modulation index)는 파장가변 진폭에 대한 흡수선폭의 비를 의미하며, 파장가변 분광법에 있어서 중요한 인자이다. Fig. 3은 변조지수에 따른 2차 조화파 푸리에 계수 변화를 나타낸 것으로 $m = 2.2$ 에서 제일 큰 P 강도(positive peak intensity)를 가지고 있음을 볼 수 있으며, 이는 다시 말해 최대의 신호 대 잡음비(SNR)를 얻기 위해서는 파장변조 진폭이 흡수 선폭에 비해 2.2배 커야 함을 의미한다.

이와 같은 파장변조 기법은 직접 흡수기법에서 흔히 발생하는 잔류진폭변조(residual amplitude modulation), 레이저 과잉 잡음(laser excess noise) 및 shot 잡음과 같은 고주 잡음을 효과적으로 제거할 수 있어 높은 SNR(signal to noise ratio)를 얻을 수 있고 이를 통한 계측 감도(sensitivity)를 높일 수 있어 계측 정밀도를 증대시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 광원의 불규칙한 동요에 의한 효과를 보정할 수가 있다.⁽⁵⁾

3. 실험 장치 및 방법

3.1 파장 가변 흡수 분광 시스템

다이오드 레이저 흡수분광 시스템은 Fig. 4에서 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 전원제어부

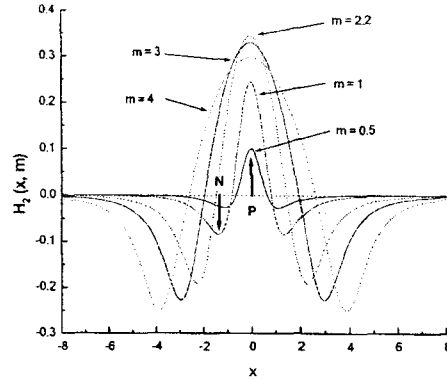


Fig. 3 Comparison of second harmonic Fourier coefficient with modulation indices

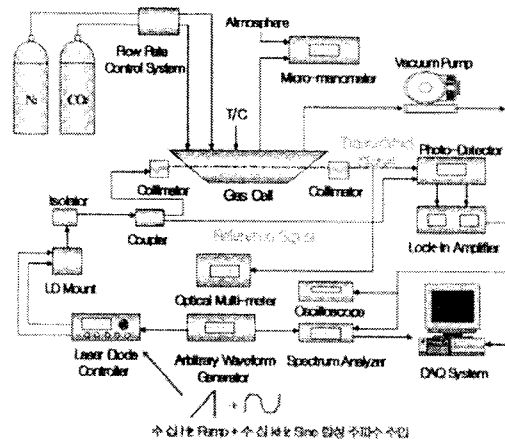


Fig. 4 Schematic of TDLAS system.

와 다이오드 레이저 소자의 온도를 정밀하게 조절하는 온도제어부로 구성되어진다. 다이오드 레이저의 온도를 조절하는 마운트는 10kΩ thermistor가 부착되어 다이오드 레이저 소자의 온도를 측정하고, 마운트 내부에 부착된 열전 소자(thermoelectric element)를 이용하여 온도 제어부에 의해 온도가 조절되어진다. 흡수 선형상 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 결정하였으며, 파장변조를 위해 수~수십 kHz의 주파수를 가지는 사인파를 램프파와 합성하였다. 이렇게 생성된 파형을 다이오드 레이저 컨트롤러에 공급하여 다이오드 레이저 입력 주사전류를 동조 시킴으로써 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.

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 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 3-axis 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,

lock-in amplifier, 디지털 오실로스코프, 그리고 신호 분석/수집 시스템으로 구성된다. Auto-balanced photo receiver는 coupler에서 분기된 기준 신호와 cell을 지난 통과 신호를 동시에 계측하고, 이를 서로 상호 비교하여 신호 중에 포함되어 있는 동상 잡음(common mode noise)을 제거할 수 있으며, 이를 통해 계측 정밀도를 개선하였다. lock-in amplifier를 통해 photo receiver가 검출한 신호에서 1,2차 조화 신호를 추출하고, 이를 오실로스코프와 신호해석을 위한 컴퓨터로 보내 신호분석 및 분광학적 변수들의 반영 과정을 거쳐 농도로 변환된다.

3.2 가스 셀 시스템

파장변조 분광법을 이용한 가스 농도의 계측을 위해, 가스 셀(gas cell)을 이용한 측정 시스템을 구성하였다. 가스 셀은 레이저 빔을 통과 시키기 위해 양단 끝부분에 지름 50mm의 고투과율을 가진 투명창으로 구성되어 있으며, 흡수 길이 700mm로 정밀 제작하였고, 빔의 내부 반사를 최소화하기 위하여 cell 내부를 아노다이징 착색을 하였다. 레이저 광의 흡수가 발생하지 않는 질소가스와 이산화탄소 가스의 분압 조절을 통해 가스 농도를 조절하였으며, 분압의 측정은 미세차압계를 이용하여 측정하였으며, 대상 가스의 온도 계측을 위해 가스셀 중심부 상단에 영점 보정한 T-type 열전대를 사용하여 가스의 온도를 측정하였다.

3.3 흡수 파장 선택

CO₂에 대한 흡수 파장, 선강도, 선폭 확대 계수 등 각종 분광학적인 변수들은 지구 대기 흡수 분광 분석을 위해 Rothman⁽⁶⁾ 그룹에서 개발한 HITRAN 데이터베이스를 이용하여 산출하였다. 이 데이터베이스를 통해 다른 가스와 흡수 상호 간섭을 피할 수 있는 최적 흡수 파장의 선정 및 계측된 결과의 정량화를 위한 각종 인자를 결정하였다.

Fig. 5는 근적외선 영역(Near IR)의 CO₂의 흡수 스펙트럼으로, 1600 nm와 2000 nm 부근에서 넓은 흡수 밴드가 존재하고, 2000 nm

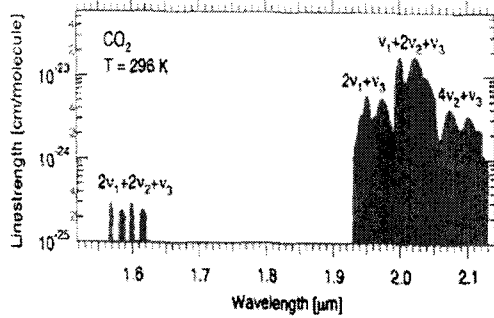


Fig. 5 CO_2 spectra of absorption bands using Herzberg notation

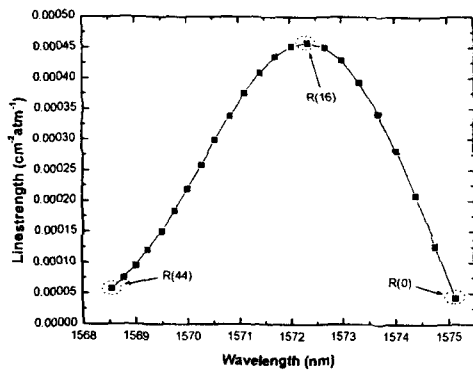


Fig. 6 Predicted CO_2 linestrength from 1568 - 1575nm using HITRAN 2002(296K, 1atm)

nm 부근이 1600nm 영역에 비해 훨씬 더 강한 선강도를 가지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 H_2O 등 다른 가스에 의한 간섭 효과가 적고 광통신용으로 널리 사용되는 DFB 다이오드 레이저의 발진 파장과 유사한 1575 nm 부근의 $2\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$ 파장을 계측 대상으로 선정하였다. 그리고 Fig. 6과 같이 HITRAN 데이터베이스를 이용해서 얻은 선강도의 비교를 통해 R(16) 라인이 $2\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$ 밴드에서 제일 강한 흡수 선강도를 가지고 있음을 확인할 수 있고, 이를 계측 흡수 파장으로 결정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 7은 주입되는 변조 사인파의 상변화에 따른 2f 신호 특성을 나타낸 결과이다. 그림에

서 보는 바와 같이 위상차를 변화시킴에 따라 신호 형상 및 2f 강도의 차이가 발생하는데, 이는 합성 파형에 내포되어 있는 변조 사인파를 주입하는 임의 파형 발생기와 2f 신호를 추출하는 lock-in 증폭기와 위상 차이로 인해 나타나는 현상이다. 양수와 음수의 위상차에 따라 대칭 형태를 가지는 정반대의 2f 신호가 형성됨을 확인할 수 있었으며 본 연구에서는 위상차가 -180° 부근일 때 최적의 2f 신호가 형성됨을 파악할 수 있었다. 이는 본 연구에서 사용한 임의파형 발생기와 Lock-in amplifier 사이에서 형성되는 장비 고유의 위상차에 의한 것으로 판단되며, 이상의 결과로 미루어 볼 때 구성된 계측 시스템의 특성에 따라 변조 사인파의 위상과 추출에 필요한 기준 파형의 위상을 정확하게 제어해야만 최대 흡수 강도를 가진 2f 신호를 추출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 파장 변조기법을 이용한 2f 신호에 대해 변조 진폭 50mV를 기준으로 변조 주파수를 변화시켰을 때의 형상 및 P 강도(positive peak intensity)와 N 강도(negative peak intensity)를 합산한 전체 강도에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 5kHz 이하의 변조 주파수를 주입하였을 때 흡수 강도는 매우 강하지만, 상대적으로 신호에 내재되어 있는 잡음이 증가하는 경향을 파악할 수 있었다. 반면에 20kHz 이상의 변조 주파수에서는 잡음이 현격히 줄어들지만, 흡수 신호가 미약해지는 파악할 수 있다.

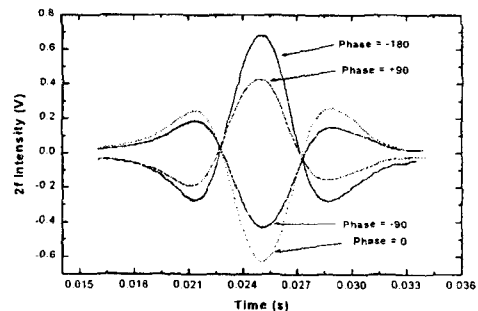


Fig. 7 Comparison of 2f signal with different phase

이는 낮은 변조 주파수의 경우, 이보다 높은 주파수를 가지는 레이저 과잉 잡음(LEN)이나 잔류진폭변조(RAM)에 의한 영향으로 인한 잡음이 증가하기 때문에 발생한 것으로 변조 주파수의 증가시킴에 따라 이런 잡음의 영향을 배제할 수 있다. 그러나 결과에서 보듯이 변조 주파수가 증가할수록 잡음의 영향은 배제할 수 있으나, 이런 영향의 배제로 인해 흡수 신호 자체의 강도가 감소하게 되므로, 최적의 신호 대 잡음비를 얻기 위해서는 광원 및 계측 시스템의 특징에 따라 변조 주파수를 조절해야 한다.

Fig. 10과 Fig. 11은 변조 주파수 15kHz로 고정한 상태에서 변조 진폭의 변화에 따른 2f 신호의 특성과 전체 강도에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 변조 진폭

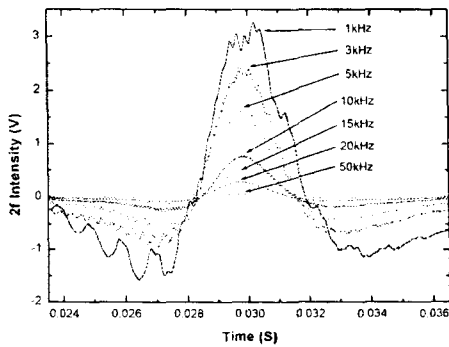


Fig. 8 Comparison of 2f signal with modulation frequency

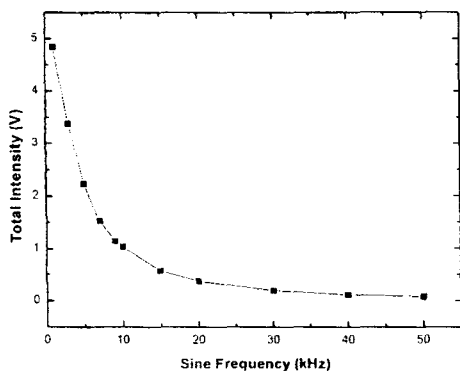


Fig. 9 total intensity of 2f signal with modulation frequency

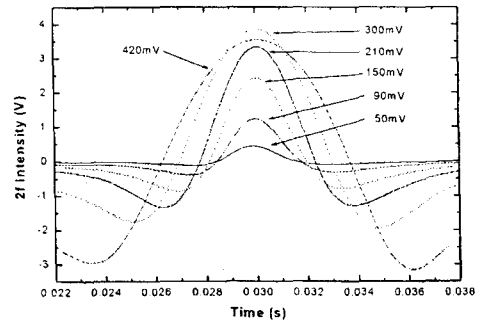


Fig. 10 Comparison of 2f signal with modulation amplitude

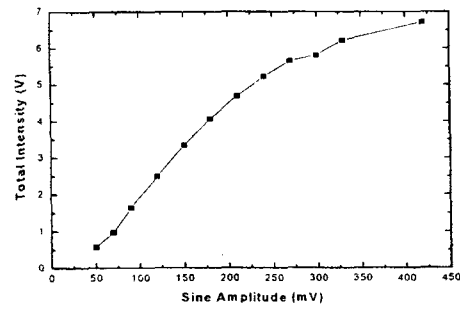


Fig. 11 Total intensity of 2f signal with modulation amplitude

이 커짐에 따라 선폭은 계속 넓어지지만, 반면에 P 강도는 210mV에서 최대가 되며 그 이상의 진폭에서는 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 앞서 살펴 본 바와 같이 2차 조화 신호 푸리에 계수의 이론적인 최대값이 변조지수 2.2 일때 형성되며, 변조 진폭이 210mV 일 때가 조화신호의 최대값을 가지는 이론적인 변조 지수 2.2에 가장 근접하기 때문이다. 따라서 신호 대 잡음비를 고려할 때 변조 진폭이 210mV이고, 변조 주파수가 15kHz인 경우가 본 연구에서 적용된 변조 사인파의 최적 조건이라 할 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 1~8% 및 0.1~0.9% 사이의 농도 변화에 따른 2차 조화 신호를 나타낸 것으로 농도의 변화에 따라 조화 신호의 최대치가 비례하는 것을 볼 수 있으며, 농도가 감소함에 따라 흡수 신호는 감소하고 잡음이 점차 증가함을 알 수 있다. 1%에서 8%까지의

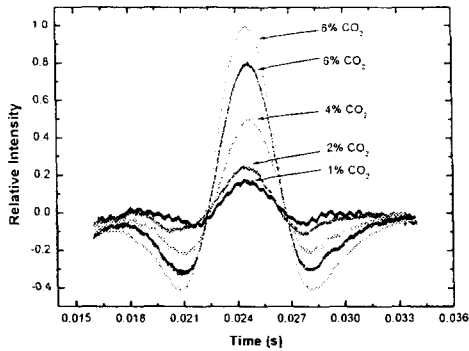


Fig. 12 Comparison of 2f signal with gas concentration (1~8%)

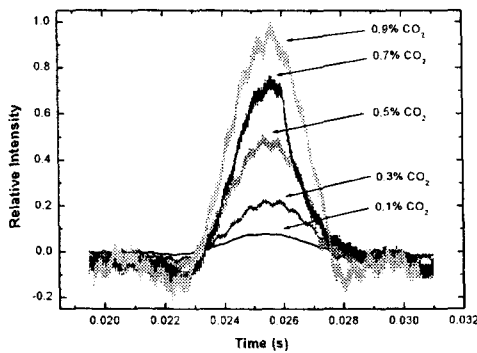


Fig. 13 Comparison of 2f signal with gas concentration (0.1~0.9%)

농도 변화에 따른 신호는 뚜렷한 2차 조화파의 형태를 가지고 있으며 1% 미만일 때보다 상대적으로 잡음에 의한 영향이 적게 나타났다. 하지만 1% 미만의 조건에서는 농도가 감소함에 따라 신호 강도가 미약해지고, 이로 인해 잡음의 영향이 증가하여 신호 형상이 2차 조화파 고유의 형상과 차이를 보이게 됨을 관찰할 수 있다. 이상의 결과를 통해 본 기법을 통한 농도 측정의 가능성과 함께 본 기법의 측정 한계는 잡음 영향에 의해 지배적임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 다이오드 레이저와 광섬유 기

간의 광학계로 구성된 파장가변 흡수계측기법(TDLAS)을 적용한 농도 계측 시스템을 구축하고, 파장변조 분광법을 통해 CO₂ 가스의 농도 계측이 가능함을 확인할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분광학적 데이터베이스인 HITRAN을 통해 얻은 결과를 통해, 1570 - 1574nm 사이에서 여러 흡수 신호가 발생함을 확인하였고, 그 중 가장 강한 흡수 신호를 가지는 R(16) 천이를 대상으로 흡수 분광 실험을 수행하였다.
2. 파장변조 분광기법을 이용한 이산화탄소 농도의 계측 실험 결과, 농도의 증가에 따라 흡수에 의한 2차 조화신호 강도가 비례적으로 증가함을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 본 계측 기법을 이용한 농도 계측이 가능함을 확인할 수 있었다.
3. 변조 주파수, 변조 진폭 및 위상차에 대한 신호 특성을 살펴보았으며, 이 결과 최대의 신호 대 잡음비를 얻기 위해서는 측정 가스의 분광학적 특징에 따라 상기 인자에 대한 최적화가 필요함을 확인할 수 있었다.
4. 낮은 농도에서는 흡수 강도의 감소로 인해서 기타 잡음의 영향이 증가하여 조화 신호가 형상이 왜곡되고 신호 대 잡음비(SNR)가 감소할 것을 관찰할 수 있다. 이는 본 기법을 적용한 계측 한계로 이어지는데, 이를 극복하기 위해서는 multi-pass cell을 이용한 흡수 신호 증폭과 필터링 등 개선된 신호 처리 기법을 이용한 잡음 제거를 통해 가능할 것으로 판단된다.
5. 향후 실제 연소 시스템의 화염장 내 연소 특성 분석과 배기단에서 배출되는 배기 가스의 정량적인 농도 계측을 통한 연소 진단을 위해서는 다양한 분광학적 변수들의 분석과 굴절률, 입자상 물질에 의한 산란, 온도 변화 등을 고려할 수 있는 계측 기법의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. M. G. Allen, "Diode Laser Absorption Sensors for Gas-Dynamic and Combustion Flows," *Meas. Sci. Tech.* 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 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. Tech.* 9, 1998, pp. 327-338.
4. 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.
5. Hanson, R. K., "Recent Advances in Laser Based Combustion Diagnostics," *AIAA 35th Aerospace Sciences Meeting*, 1997, pp. 97-115.
6. Rothman, L. S., "The HITRAN Molecular Database : Editions of 1991 and 1992," *J. Quant. Spectroscopy and Radiation. Transfer* 48, 1992, pp. 469-507.