

# 연소배기 가스의 계측을 위한 다이오드 레이저 센서

신명철\* · 김세원\* · 김동혁\*\*

## Diode-Laser Absorption Sensors for measurement of combustion Gas

Myung Chul Shin, Se Won Kim and Dong Hyuck Kim

### ABSTRACT

This work focus on the development of gas sensor that measure the concentrations of exhaust gas using diode laser. Each diode laser for exhaust gas measurement is set to work at near-IR using both DA and WMS methods. Also use of fiber-coupled optical elements makes such a sensor rugged and easy to align. The results showed that gas concentrations of O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO are accurately measured within ±2% error. The application of WMS method increased the beam intensity 2-3 times higher than DA method. It were experimentally compared WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy) with DA (Direct Absorption) for the accuracy.

**Key Words** : Distributed-Feedback Diode Laser, Combustion Diagnostics, Direct Absorption, Absorption Spectroscopy, Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), WMS(Wavelength Modulation Spectroscopy)

### 기 호 설 명

$I_t$	투과 신호강도	$P_{2f}$	The measured peak 2f signal at the line-center $\nu_0$
$I_o$	기준 신호강도	$m$	Modulation index
$P$	전체 압력 (atm)	$N$	Absorbing species number density
$x_j$	대상 성분의 몰 분율		
$L$	광학 흡수 길이 [cm]		

### 1. 서 론

본 연구는 파장 가변 형 다이오드 레이저를 기반으로, 광 흡수 분광학을 이용한 새로운 방식의 계측 기법이다. 다이오드 레이저 센서는 분자들

의 레이저 흡수를 통한 레이저 신호의 흡수선을 분석하여 농도를 산출해 낼 수 있다. 분자들의 운동은 회전(Rotation)운동, 진동 (Vibration) 및 병진 운동을 일으킨다. 그러나 일정 체적 안에서 일어나는 분자 운동은 회전 운동에 의한 에너지가 대부분을 차지한다. 이러한 회전 운동에 의한 분자들의 상태가 high state 상태가 되어, 레이저의 빛과 충돌하게 될 경우, 흡수가 일어나게 되고 그러한 흡수된 양을 통해 농도를 계산해 낼 수 있다. 흔히 분자 흡수 분광학 (molecule

\* 한국생산기술연구원

\*\* 한양대학교

† 연락처, mcshin@kitech.re.kr

absorption spectroscopy)에서의 계측 기법은 직접 흡수 기법(Direct absorption method),과 파장 변조 기법 (Wavelength modulation spectroscopy)을 이용한다. 본 연구에서는 계측하고자 하는 연소 배기가스(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO)의 농도를 상기 두 기법을 적용 비교함으로써 정밀도의 차이를 분석하였다. 또한, 연소시스템에 직접 적용함으로써 그 적용 가능성을 검증해 보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 DA Method

흡수 분광학에 적용되는 기본적인 이론은 식 (1)의 Beer-Lambert 방정식으로부터 설명될 수 있다[1,4,5,7].

레이저의 최초의 강도 즉 기준강도 ( $I_0$ )와 빛이 흡수 영역을 투과된 후의 강도( $I_t$ )의 비는 선 강도 (Linestrength;  $S_i [cm^{-2} atm^{-1}]$ ), 선형함수 (Lineshape function;  $\Phi [cm]$ ), 전체 압력 (Total pressure P [atm]), 흡수가 일어나는 화학종의 몰 농도 (mole fraction of the absorbing species;  $x_j$ ) 그리고 빛의 흡수 길이 (Pathlength: L [cm])의 곱에 지수 함수로 정의된다[4].

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp(-S_i \Phi P x_j L) \quad (1)$$

레이저의 두 신호 강도  $I_0$ ,  $I_t$ 는 식 (2)에서와 같이 흡수율  $a_v$ (absorbance)로 전환될 수 있다 [4].

$$a_v = -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) = S_i \Phi P x_j L \quad (2)$$

선강도  $S_i(T)$ 는 온도의 함수로서 흡수 상태에서 분자의 Boltzmann 분수에 의존한다. 온도 T에서의 특정 천이  $i$ 에 대한 선 강도  $S_i(T)$ 는 분자의 기준 온도, 선 강도, 흡수하는 분자의 부분함수, 천이 주파수 그리고 천이의 저준위 에너지에 의해 결정되어진다.

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T}\right) \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_{o,i}}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_{o,i}}{kT_0}\right)\right] \quad (3)$$

분할 함수 (partition function)인  $Q(T)$ 는 각각의 nuclear, rotation, vibration 분할함수인  $Q_{vc}$ ,  $Q_{rot}$ ,  $Q_{vib}$ 의 결과로 나타낼 수 있으며, 아래의 식 (5)과 같이 간략하게 a, b, c, d에 대한 3차 다항식으로 계산할 수 있다.

$$Q(T) = Q_{vc} Q_{rot} Q_{vib} \quad (4)$$

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (5)$$

### 2.2 WMS Method

WMS (wavelength modulation spectroscopy)는 다이오드 레이저 광원에 30 kHz 정도의 변조 주파수를 걸어 주어 수광부에서 증폭된 first(1f) 또는 second(2f) 조화 신호를 통해 대상 물질의 농도 및 온도 변수 값들을 도출해내는 광 계측 기법으로서, 직접 흡수기법에 비해 좁은 선폭을 가지고, 높은 신호대잡음 비 (signal to noise) 값을 얻을 수 있으며, 상대적으로 감도(sensitivity)를 높일 수 있어 계측 정밀도를 증대시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 대상 물질의 측정 영역을 통과한 신호에서 얻은 DC 성분 중 추출한 2f 신호를 통해 noise를 효과적으로 제거할 수 있다. WMS 기법과 관련한 이론 및 수식을 나타내면 다음과 같다.

레이저 주파수  $\nu$ 를 변조 크기가  $m$ 인 주파수  $\Omega$ 로 변조시켰을 때, 대상 물질의 측정 영역을 통과한 흡수 강도( $I_T$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$I_T(\nu) = I_T(\nu + m \sin \Omega t) \quad (6)$$

이 식을 Taylor 급수로 전개하면,

$$I_T(\nu + m \sin \Omega t) = I_T(\nu) + (m \sin \Omega t) \frac{dI_T}{d\nu} + \left(\frac{m^2 \sin^2 \Omega t}{2!}\right) \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \left(\frac{m^3 \sin^3 \Omega t}{3!}\right) \frac{d^3 I_T}{d\nu^3} + \dots \quad (7)$$

이고, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_T(\nu + m \sin \Omega t) = [I_T(\nu) + \frac{m^2}{4} \frac{d^2 I_T}{d\nu^2} + \dots] +$$

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

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 변수 값들을 유출해낼 수 있다.

### 2.3 농도 산출 방법

#### 2.3.1 직접 흡수 기법 (DA)

계측 대상 가스에 의해 흡수가 일어나는 물분율  $x_j$ 는  $S_j, L, P$ , 및 Lineshape의 적분된 흡수 영역에 대한 관계식으로 식 (9)과 같이 산출할 수 있다[5].

$$x_j = \frac{Area}{S_j PL} \quad (9)$$

그러나 선형함수(Lineshape)에 대한 정보를 파악할 수 있다면, 대상가스의 물 농도는 흡수율  $\alpha_v$ 와 동일 주파수 일 때의 Line-shap  $\Phi_v$ 에 의한 관계식으로 계산할 수 있다[5].

$$x_j = \frac{\alpha_v}{S_j \Phi_v PL} \quad (10)$$

#### 2.3.2 파장 변조 기법 (WMS)

WMS기법의 농도 계산은 Fig 1.에서 보는 바와 같이  $2f$  조화 신호의 최고점과 왼쪽 날개의 최저점의 높이 차 (Peak to Peak value)의 크기로서 각각의 농도를 계산할 수 있다. Fig 2.는 10 ppm에서 150 ppm까지의 농도별  $2f$  신호의 크기 및 Peak to Peak 값을 보여 주고 있다.

WMS 기법의 농도 환산은 실험을 통한 정량적 관계식을 유도해 낸다. 즉 Fig 1.과 같은 Peak to Peak의 voltage 값( $V_{p-p}$ )을 기준가스 농도를 이용하여 계측 한 후 그 관계식을 도출해 낸다. 다음의 식은 WMS 기법을 이용하여 CO 농도 계측 시 농도 환산식이고 Fig15.의 WMS 농도 계측에 사용되었다.

$$CO \text{ concn. (ppm)} = \frac{1}{0.00107} (V_{p-p} + 0.01393) \quad (11)$$

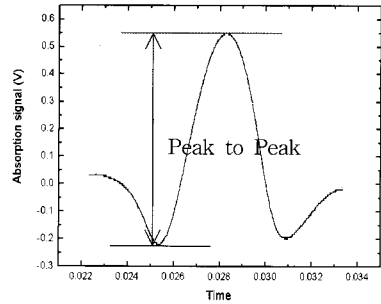


Fig. 1 WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy)를 이용한 CO 계측

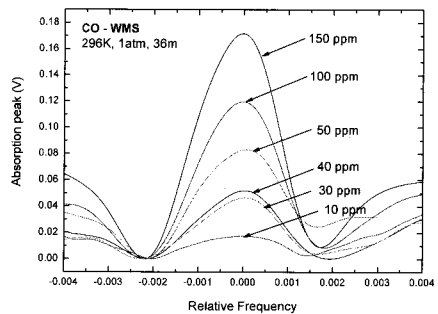


Fig. 2 WMS Absorption signal

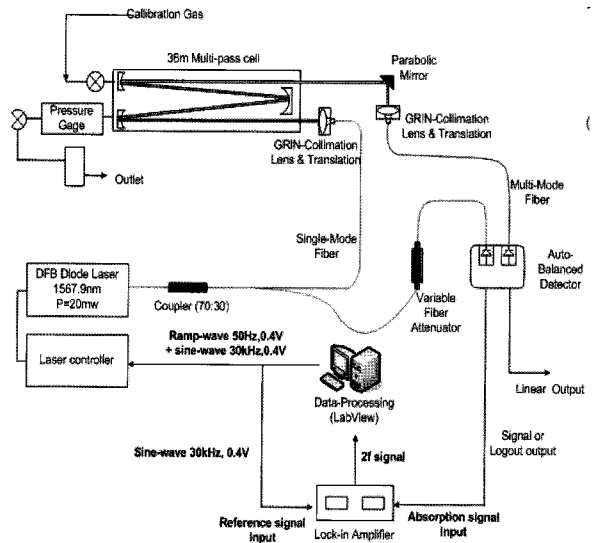


Fig. 3 Schematic diagram of the DFB diode-based sensor system

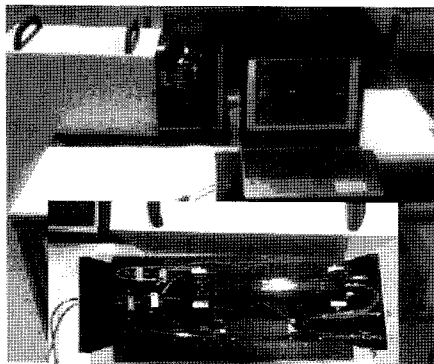


Fig. 4 Picture of the diode based sensor system

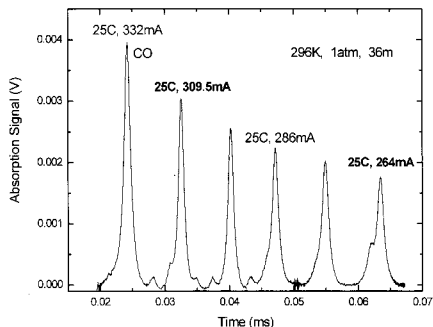


Fig. 8 Measured CO survey spectra from near 1568.9 at 296 K, 1atm

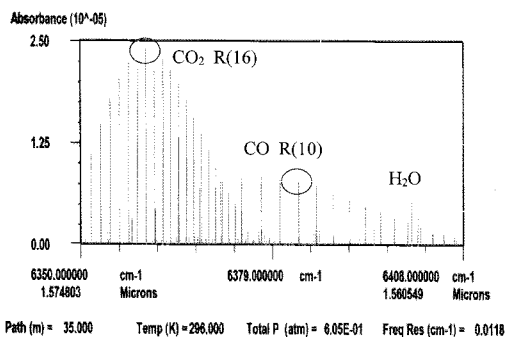


Fig. 5 Calculated survey spectra of CO, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O in the 6350 - 6408cm<sup>-1</sup> spectral region (296 K) using the HITRAN-PC database

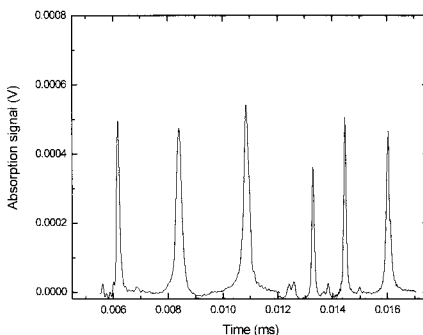


Fig. 9 O<sub>2</sub>의 실제 측정에 의한 흡수 크기 및 특성

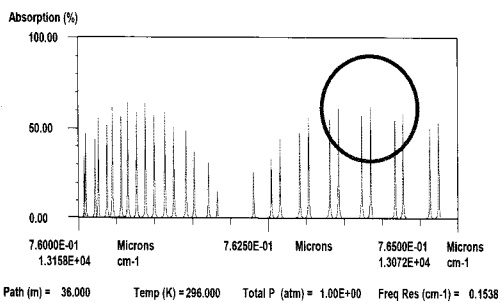


Fig. 7 O<sub>2</sub>의 파장에 따른 흡수 크기 및 특성 (760~765 nm)

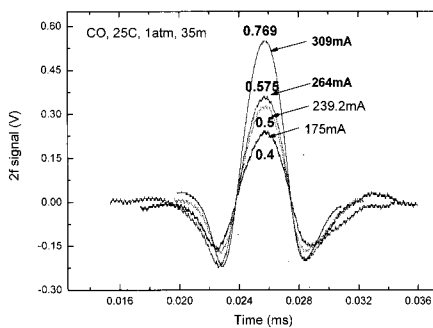


Fig. 10 Size of 2f signal with different wavelength.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장비 및 구성

광 계측 시스템 실험 장치는 Fig3.에 나타난 바와 같이 크게 하드웨어 부분과 검출부로부터 흡수 신호를 받아 처리하는 소프트웨어 부분으로 나눌 수 있다[4].

하드웨어 부분은 다이오드 레이저 컨트롤러와 마운트, 임의 파형 발생기 (Arbitrary waveform generator) 및 레이저 광원으로 구분되어진다. 다이오드 레이저는 조사된 계측 대상가스의 흡수 파장에 따라 DFB, VCSEL 방식을 채택하였으며, 각각의 대상가스의 흡수 파장에 따라 근 적외선 영역대의 DFB 다이오드 레이저와 VCSEL 다이오드 레이저를 사용하였다. Table 1.은 본 연구에 사용된 다이오드 레이저의 종류와 흡수 파장을 나타내고 있다. 임의 파형 발생기 (Arbitrary waveform generator)는 파장 변조 기법을 적용하기 위해 Ramp 파형을 레이저 컨트롤러 (ILX Light-wave 社의 LDC-3908 Laser Diode Controller)에 공급하기 위해 사용 되었으며, 또한 광 부품들의 연결 편리성 및 현장 적용을 고려하여 광섬유 방식 (Optical fiber type)을 기반으로 하였다.

Table. 1 계측에 사용된 다이오드 레이저와 흡수파장

대상가스	흡수파장 (nm)	출력	Type
CO <sub>2</sub>	1572.3	20mW	DFB
CO	1567.9	20mW	DFB
O <sub>2</sub>	760	10mW	VCSEL
NO	1790	10mW	VCSEL

Detector (Auto-balanced detector: New Focus 社.)에 의해 검출된 흡수 신호는 DAQ 시스템과 해석 프로그램(Software)으로 보내져 분석하게 된다. WMS 기법에서는 receiver에서 증폭된 신호가 dual phase lock-in amplifier로 들어가 1f 나 2f 조화 신호로 추출되어 증폭하게 된다. 또한, 현장 적용에 용이 하도록 본 계측 시스템을 휴대형(Portable)으로 구성하였으며, 실물 사진은 Fig 4와 같다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 다이오드 레이저 계측 시스템의 장치의 구성은 다음과 같다. 다이오드 레이저 시스템은 상단에 위치한 광학 부분 (Optic part)과 신호를 처리하

고 분석하는 노트북 컴퓨터, 하단에 위치한 다이오드 레이저 컨트롤러 그리고 DAQ 장비로 구성되어 있으며, 또한, 그 외에 WMS에 사용되는 Lock-in Amplifier를 실험에 사용하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 흡수 라인 선정

본 연구에서는 HITRAN Data-base를 이용하여, 대상가스 와 H<sub>2</sub>O 혹은 다른 가스와의 상호 간섭 여부와 가장 높은 선강도(Line-strength) 및 흡광도(Absorbance)를 보이는 파장 대를 선별하였다. 또한, 보다 정확한 선별과 다이오드 레이저를 결정하기위해 실험적으로 분석하였다 [1-6].

Figure 5.는 HITRAN에서 계산된 CO, CO<sub>2</sub>, 와 H<sub>2</sub>O의 Absorbance를 나타내고 있으며, Fig 8.은 실제로 계측된 대상가스의 흡수신호 (Absorption signal)를 보여 주고 있다.

신호의 크기는 정량적 분석 시 같은 농도, 같은 조건하에서 크기가 클수록 정밀 계측 및 낮은 농도의 계측이 가능하므로 가능한 큰 흡수 신호가 선택되어야만 한다. 본 연구에서는 CO, CO<sub>2</sub>, 와 O<sub>2</sub>를 계측 대상 가스로 정하고, CO의 경우는 다른 가스와의 간섭이 적으면서 흡수 신호가 가장 큰 R(10)를 선별하였다. Fig 10.은 대상가스 (CO)의 파장별 2f 신호의 크기를 비교한 것이다. R(10)의 파장을 가지는 CO의 흡수 신호는 다이오드 레이저 컨트롤러 (Diode laser controller)의 25°C, 286 mA에 해당되는 흡수 신호이다.

Figure 11. 12.는 각각 CO의 주입 파형인 sine 파형의 주입 주파수와 주입 전류의 변화에 따른 파장의 변화별 2f 신호의 크기를 비교한 것이며, Fig 10.와 같이 다이오드 레이저 컨트롤러에 의해 흡수 파장을 변화 시키면서 2f 신호의 크기를 비교한 것이다. 즉 흡수 파장의 크기가 클수록 2f 신호의 크기가 증가함을 알 수 있다. 이것은 Fig 8에서 보는 바와 같이 300 mA 근처의 흡수 신호가 크기 때문이다. 다이오드 레이저 컨트롤러의 300 mA의 근처 흡수 신호가 Fig 5.에서 보여진 1567.9 nm의 파장을 가지는 R(10)의 CO 흡수 신호이다. 또한, Fig 6,7.은 O<sub>2</sub>의 흡수 파장과 흡수 신호 선별을 보여 주고 있다.

#### 4.2 실험 조건

WMS 계측 시에는 식 (6)과 Fig 11.에서 알 수 있듯이 변조(Modulation) 주파수 (Frequency) 및 크기(Amplitude)를 결정하여 램프파와 합성파를 만들어 Lock-in Amplifier로 보내져야한다. 그러므로 본 논문에서는 실험 조건을 다음과 같

이 수행하였다. 변조 주파수의 크기를 실험적으로 확인하고, 가장 적합한 주파수를 선택하기 위해 사인파 (변조 주파수의 종류)를 Fig 11.에서와 같이 20 kHz부터 100 kHz까지 변화시키면서 2f (2차 도함수)신호의 크기를 비교하였다. 또한 Fig 12과 같이 사인파의 진폭 (Amplitude)을 변화시키므로써 변조 주파수의 크기를 실험적으로 최적의 조건을 결정하였다.

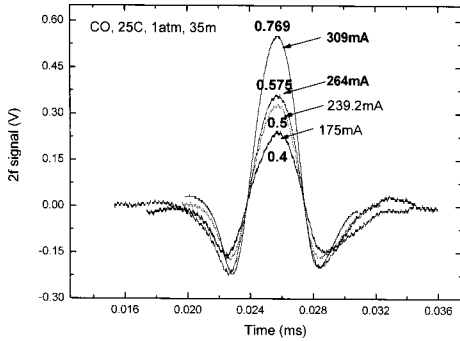


Fig. 10 Size of 2f signal with different wavelength.

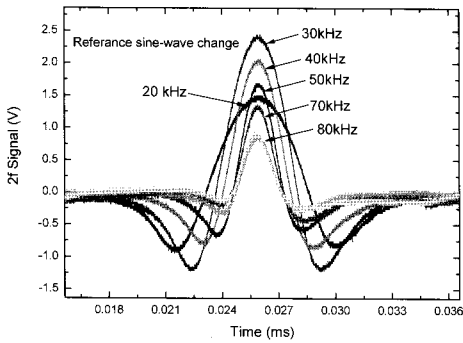


Fig. 11 Shape of 2f signal with different sine-wave frequency.

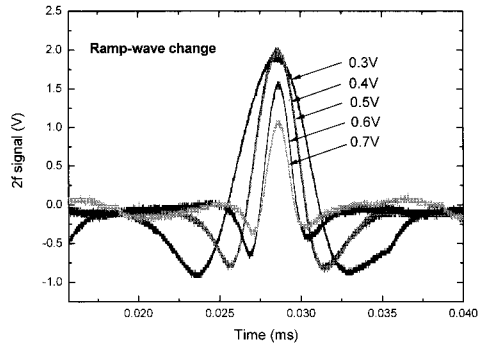


Fig. 12 Shape of 2f signal with different sine-wave amplitude.

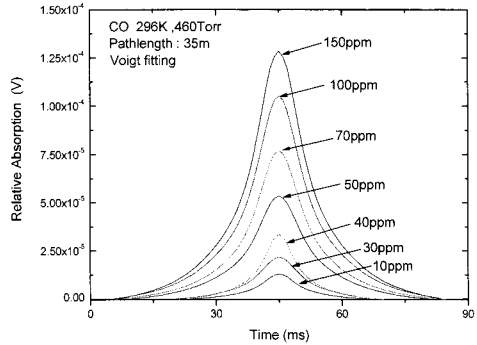


Fig. 13 DA Absorption signal

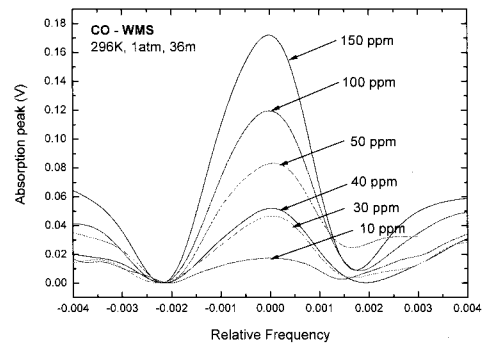


Fig. 14 WMS Absorption signal

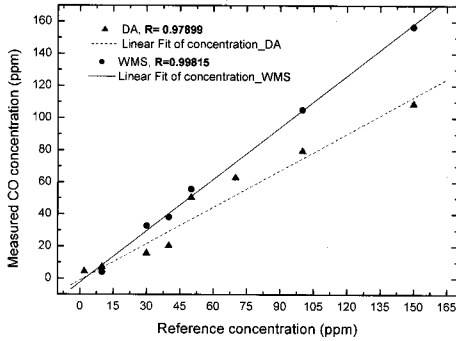


Fig. 15 Comparison with Measured DA and WMS concentration (CO)

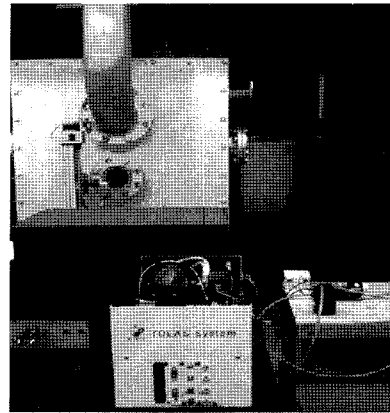


Fig. 17 Picture of the diode laser sensor system

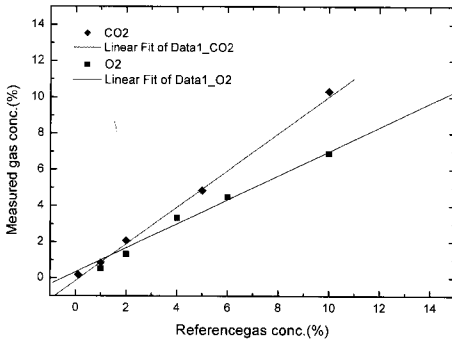


Fig. 15 Measured concentration using Diode laser sensor (CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>)

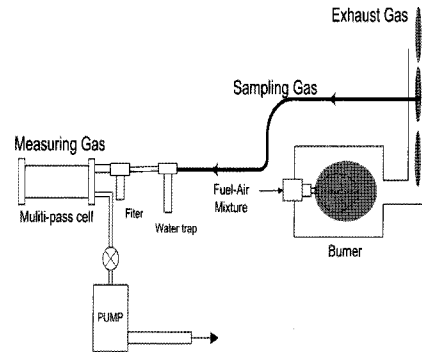


Fig. 18 Schematic diagram of the sampling system[7]

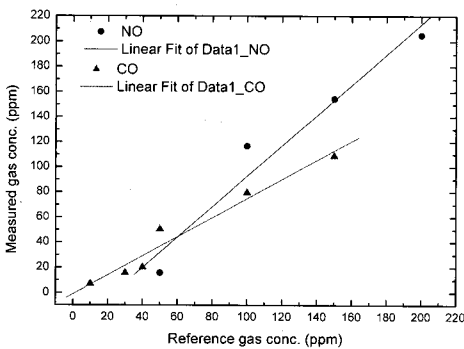


Fig. 16 Measured concentration using Diode laser sensor (NO and CO)

그 결과 WMS 농도 계측 시 2f 신호의 왼쪽 최저값과 최고값의 높이차 (Peak to Peak value)에 의해 농도 값을 산출하므로 신호가 가장 크면서, 형상이 왼쪽과 오른쪽이 대칭인 사인파의 주파수 30 kHz와 진폭 0.4 V의 2f 신호를 결정하였다.

### 4.3 DA와 WMS 계측 결과 분석

Figure 13과 14는 각각 DA 기법과 WMS 기법을 사용하여 농도별 흡수신호의 형상 및 크기를 비교한 것이다. 이것은 정량적 계측이 가능함을 보여주고 있다.

Figure 15는 각각 직접 흡수 기법 (Direct Absorption Method)과 파장 변조 기법 (Wavelength Modulation Spectroscopy)의 흡수신호를 비교한 것이다. 직접 흡수 기법의 경우 흡수 신호 영역의 적분된 값을 농도 산출 시 사용되므로, 신호의 불안정 및 잡음 (Noise)의 크

기와 영향을 많이 받는다. 그러나 파장 변조 기법의 경우는 2f 신호의 크기를 그대로 농도 산출에 사용됨으로, 직접 흡수 기법과는 달리 비교적 안정된 흡수 신호를 얻을 수 있고 Fig 15.에서와 같이 선형성 및 정량적 특성이 WMS 기법이 DA 기법에 비해 매우 효과적임을 알 수 있다. 이것은 또한 정밀 계측과도 연관이 있어 중요한 부분이다. 각각의 표준 농도에 따라 직접흡수 기법을 통해 계측 후 농도 산출을 그래프로 나타낸 것과 같은 방법으로 파장 변조 기법을 사용하여 계측 후 2f 신호의 크기에 따라 농도를 산출한 값을 비교, 분석하여, 두 그래프를 비교해 보면, 같은 조건 (296 K, 1 atm)하에서 파장 변조 기법을 사용하였을 때, 직접 흡수 기법의 경우보다 계측 오차가 각각 0.2 %와 2.1 %로 약 10배가 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 또한 직접 흡수 기법으로 CO 계측 시 10 ppm 이하의 농도까지 계측할 수 있었으나, 같은 조건 (296 K, 1 atm)에서 계측 시 직접흡수 기법은 70 ppm까지가 계측이 가능하였다.

Figure 16은 연소기에서 연소배기 가스 계측을 고려하여, ppm 단위로 계측되는 CO, NO를 표준 가스농도(Reference gas)를 사용하여, Diode laser sensor로 계측된 농도 값을 나타내고 있으며, Fig. 17.은 % 단위로 계측되는 CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>를 계측한 결과를 나타내었다. Fig16 과 Fig 17에서 나타나는 바와 같이 CO, NO는 ppm 단위의 계측이 필요하므로 보다 정밀 계측이 가능한 WMS 기법을 이용하는 것이 효과적이며, CO<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>의 경우는 %단위의 계측이 요구 되므로 DA 기법을 사용함이 효과적이다. 이는 WMS의 경우 흡수 신호 및 형상의 크기가 클 경우, 즉 높은 농도 (% 단위)일 경우 Lock-in Amplifier의 과부하가 생길 수 있기 때문이다.

#### 4.4 계측기법의 연소 시스템 실적용

본 유해가스 농도 계측 시스템을 실제 연소 시스템에 적용하기 위해서 현장 적용이 용이한 휴대 가능한 (Potable) 시스템을 구성하였고, 온도 및 압력을 일정하게 보정시키기 위해 Fig 19와 같은 시스템을 설계하였다. 이는 흡수 신호가 분자 온도와 압력에 영향을 받기 때문이다. 본 실험에서는 배기 CO<sub>2</sub>의 농도를 정밀 계측하여 기존의 휴대형 가스 분석기 (Potable Gas Analyser)와 비교 분석하였다.

다음은 식(11)은 계산되어 얻어진 Number density값을 농도 값 (% , ppm)으로 산출하기 위해 실험 데이터로부터 얻은 식을 나타내었다.

$$CO_2 \text{ concentration}(\%) = \frac{1}{121.14} \left( \frac{Area}{S_{PL}} - 0.0607 \right)$$

Figure 19.은 연소시스템에서 연소 시 배출되는 배기가스를 Muti-pass cell 내로 흡입하기 위한 장치 (Sampling system)의 구조를 나타낸 것이다. 과잉공기비 (Excess air)에 따라 진행되는 연소 과정동안 배출되는 배기가스의 농도 계측을 위해 진공 펌프에 의해 배기가스가 흡입되며, probe를 거쳐, H<sub>2</sub>O를 최소화하기 위한 H<sub>2</sub>O 여과기를 통과한 후 Filter를 거쳐 셀 안으로 흡입된다. 여기서 배기가스의 온도를 296 K로 일정하게 유지시키기 위해 Fiter와 함께 장착된 온도 보정 장치를 사용한다. Fig 18은 실험에 사용된 버너와 계측기를 나타낸 것이다.

Figure 20, 21.은 연소 시스템에 파장가변형 다이오드 레이저 (DFB Diode Laser)로 실시간으로 계측한 것이다. Fig 20에서와 같이 다이오드 레이저 계측 기에서 계측한 CO<sub>2</sub>의 과잉 공기비에 따른 농도 값은 과잉 공기비 (Excess air ratio)가 증가할 수록 CO<sub>2</sub>는 약 14 %에서 약 10 %까지 감소함을 알 수 있다. 또한, Fig 21.은 현재 현장에서 많이 사용되고 있는 휴대용 가스 분석기로 계측된 농도 값으로서 다이오드 계측기와 동일한 계측 영역을 나타내었다. 즉, Fig 20과 21을 비교해 보면, 다이오드 레이저 계측기는 휴대용 가스 분석기와 비교 하였을 때 평균 약 0.19 %의 농도 값의 오차를 보였다.

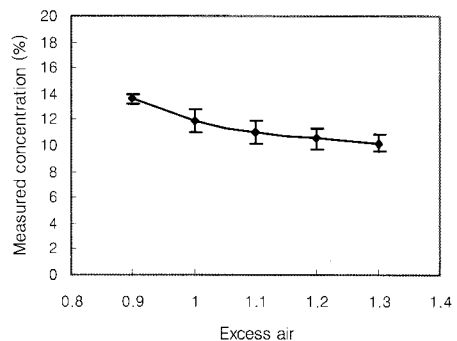


Fig. 20 Measured concentration of CO<sub>2</sub> forthe change of excess air(1 atm, 36 m, 296 k)



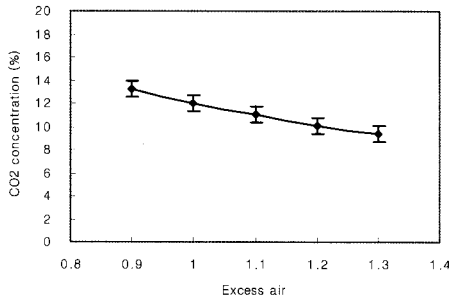


Fig. 21 Measured concentration of CO<sub>2</sub> for the change of excess air (1 atm, 36 m, 296 k)

## 5. 결론

본 연구는 파장 변조 기법 (Wavelength Modulation Absorption)과 직접 흡수 기법을 적용한 파장 가변형 다이오드 레이저 계측 센서를 설계하고 계측하여, 상기 기법의 정확도와 오차 크기를 비교, 분석하였다. 또한 직접흡수 기법 (Direct Absorption)을 이용하여, 실제 현장에서 사용되고 있는 연소 시스템에 적용함으로써 기존의 휴대용 가스 분석기와 정확도 및 오차를 분석하였다.

1. 파장 변조기법을 채택하여 연소배기 가스를 계측 시 같은 조건하 (296 K, 1 atm)에서 변조 주파수와 진폭 그리고 2f 신호의 상이 정밀 계측에 중요 인자이며, 본 연구에서 가장 적합한 값은 변조 주파수는 사인파(Sine-wave)의 30 kHz, 진폭 400 mV 임을 실험적으로 분석하였다.

2. 파장변조기법과 직접흡수기법을 기준 가스 농도를 사용하여 각각 계측하여, 비교해 본 결과 파장 변조 기법의 오차는 1.02 % 그리고 직접 흡수 기법의 오차는 3.32 %로 약 3배가 향상되었음을 알 수 있었고, 또한 이것은 정밀 계측이 요구되는 대상가스일 경우 파장 변조 기법이 효과적임을 알 수 있다.

3. 연소배기 가스를 계측 할 경우 그 농도가 % 단위로 계측이 요구 되는 대상 가스는 직접흡수 기법 (Direct Absorption Method)을 수 ppm이하의 정밀 계측이 요구 되는 계측 일 경우 파장 변조 기법 (WMS)을 사용하는 것이 효과적이다. 파장 변조 기법(WMS)를 사용할 경우, 흡수 신호의 크기가 크면 즉, 계측 대상가스의 농도가 높을 경우 (% 단위) Lock-in Amplifier에서 과부하(overload)가 생길 수 있기 때문이다.

4. 파장변조기법을 적용할 시 연소 배기가스(CO, NO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)를 1 ppm이하 0.8 ppm까지 ± 1 % - 2 %의 오차 이내로 계측이 가능함을 밝혔다.

5. 과잉 공기비 (Excess air ratio)에 따라 연소 배기가스 측정 시 파장 가변형 다이오드 레이저 계측기 (DFB Diode Laser sensor)의 표준편차 (Standard Deviation :SD)는 평균 0.73 % 임을 보였다.

## 후 기

본 연구는 환경부 차세대 핵심 환경기술 개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) J-H. Ahn "Adaptive Combustion Control Techniques for Low Emission Combustion System Using Laser Absorption Spectroscopy," The degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering college of Engineering Hanyang University, 2005.
- (2) 김동혁, 신명철, 김세원, "파장가변형 다이오드 레이저를 이용한 CO, CO<sub>2</sub> 동시 계측," 춘계 기계학회 학술대회, 대한기계학회, 2006.
- (3) 김동혁, 김세원, 신명철, "다이오드 레이저를 이용한 연소 배기가스의 농도 계측 기법 개발," 추계 기계학회 학술대회, 대한기계학회, 2006.
- (4) 차학주, "파장 가변형 다이오드 레이저 시스템을 이용한 이산화 탄소의 농도 계측에 관한 연구," The degree of Master of Mechanical Engineering, Yonsei University, 2004.
- (5) R. M. Mihalcea, D. S. Baer and R. K. Hanson, "Diode laser sensor for measurements of CO, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in combustion flows," Applied Optics Vol, 36, No. 33, 1997, pp. 8745-8752.
- (6) R. Engelbrecht, J. Euring, F. Kuntz and L.-P. Schmidt, "A Fiber-Optic Laser Spectrometer for Sensitive Simultaneous Measurement of CO<sub>2</sub> and CO Gas Concentration," 10. Int. Fair and Conference, SENSOR 20018-10.5.2000., 2001.
- (7) R. M. Mihalcea, "CO and CO<sub>2</sub> measurement in combustion environment using external cavity diode laser," The committee on graduate studies of Stanford university, April 1999, pp.1-69.
- (8) B. F. Ventruodo and D. T. Cassidy, "Operating Characteristics of a Tunable Diode Laser

Absorption Spectrometer Using Short-external-cavity and DFB Laser Diodes," *Applied Optics*, Vol. 29, 1990, pp. 5007-5013.

(9) B. L. Upschulte and M. G. Allen, "Diode Laser Measurements of Linestrengths and Self-broadening Parameters of Water Vapor Between 300 and 1000 K Near 1.31  $\mu\text{m}$ ," *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, in pres 1997.

(10) D. M. Sonnenfroh and M. G. Allen, "Observation of CO and CO<sub>2</sub> Absorption near 1.57  $\mu\text{m}$  with an External-cavity Diode Laser," *Applied Optics*, Vol. 36, 1997, pp.3298-3301.

(11) R. M. Mihalcea, D. S. Baer and R. K. Hanson, "Diode Laser Sensor for Measurements of CO, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> in Combustion Flows," *Applied Optics*, Vol. 36, 1997, pp. 8745-8787.

(12) M. Kimball-Linne, G. Kychakoff and R. K. Hanson, "Fiber-optic Absorption/fluorescence Combustion Diagnostics," *Comb. Science and Tech.*, Vol. 49, 1986, pp. 307-322.

(13) L. S. Rothman et al., "The HITRAN Molecular Database : Editions of 1991 and 1992," *Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, Vol. 48, 1992, pp. 469-507.