

파장 변조 기법을 이용한 연소배기 가스의 계측

김동혁* · 김세원** · 신명철** · 김용모***

Measurement of Exhaust Gas Concentration using Wavelength Modulation Spectroscopy

Dong-Hyuck Kim*, Myung-Chul Shin**, Se-Won Kim**, Yong-Mo 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. On-line data acquisition and processing can be performed with a PC running LabVIEW software, and absorption signals are measured simultaneously by multiplexing method. Finally, It were experimentally compared WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy) with DA (Direct Absorption) for the accuracy.

Key Words : Distributed-Feedback Diode Laser (DFB 다이오드 레이저), Combustion Diagnostics (연소 진단), Direct Absorption (직접 흡수), Absorption Spectroscopy (흡수 분광학), 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 ν_0
I_o	기준 신호강도		
P	전체 압력 (atm)	m	Modulation index
x_j	대상 성분의 몰 분율	N	Absorbing species number density
L	광학 흡수 길이 [cm]		

1. 서 론

광 흡수기법(Absorption Spectroscopy)을 기초한 Distributed Feedback (DFB) 다이오드레이저 시스템은 다른 레이저 계측 기법과는 달리 높은 정밀도와 빠른 응답률을 지니고 있으며, 광섬유

기반의 (Based-fiber) 시스템 구성으로 열악한 실제 산업 현장에서 여러 연소 가스를 실시간으로 계측하는데 많은 장점을 가지고 있다.^{(1),(2)} 또한 본 연구의 목적은 파장 변조 기법을 실제 연소 환경에 적용하여, 연소 배기가스를 측정하기 위한 실시간 파장 가변형 다이오드 계측기를 설계하고 발전시키는데 있다.

*† 한양대학교 대학원, kdh75@kitech.re.kr

** 한국생산기술연구원,

*** 한양대학교

2. 이론적 배경

2.1 WMS Method

WMS(wavelength modulation spectroscopy)는 다이오드 레이저 광원에 30 kHz정도의 변조 주파수를 걸어 주어 수광부에서 증폭된 first(1f) 또는 second(2f) 조화 신호를 통해 대상 물질의 농도 및 온도 변수 값들을 도출해내는 광 측정 기법으로서, 직접 흡수기법에 비해 좁은 선폭을 가지고, 높은 신호대 잡음비(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 있다. WMS 기법과 관련한 이론 및 수식을 나타내면 다음과 같다.

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. ⁽⁶⁾

$$I_T(\nu) = I_T(\nu + m\sin\Omega t) \quad (1)$$

이 식을 Taylor 급수로 전개하면,

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

이고, 다음과 같이 정리할 수 있다.

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

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.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장비 및 구성

Fig .1은 광 측정 시스템의 구조를 보여주고 있다. 광 측정 시스템은 크게 장비(Hardware) 부분과 검출부로부터 흡수 신호를 받아 처리하는 프로그램(Software)부분으로 나눌 수 있다. (2)

장비(Hardware) 부분은 다이오드 레이저 컨트롤러와 마운트, 임의 파형 발생기 (Arbitrary waveform generator) 및 레이저 광원으로 구분되어진다. 다이오드 레이저는 조사된 측정 대상 가스의 흡수 파장에 따라 DFB, VCSEL 방식을 채택하였으며, 각각의 대상가스의 흡수 파장에 따라 1567.93nm, 1790nm 근 적외선 영역대의 DFB 다이오드 레이저와 VCSEL 다이오드 레이저를 사용하였다. 각각 20mw의 출력을 가지는 SM (Single Mode) type의 14-pin butterfly 다이오드 레이저 그리고, 약 10mW의 출력을 가지는 TO46 VCSEL 다이오드 레이저를 사용하였다. VCSEL의 경우는 SM (Single Mode), FC-APC Type의 광 섬유 (Optical fiber)로 집광시켜 사용되었다. 임의 파형 발생기 (Arbitrary waveform generator)는 파장 변조 기법을 적용하기 위해 주파수 50Hz, 400mv의 진폭을 가지는 Ramp파형을 레이저 컨트롤러 (ILX Light-wave 社の LDC-3908 Laser Diode Controller)에 공급하기 위해 사용 되었으며, 장비의 효율성을 고려하여, LabView 기반의 NI (National Instrument) 장비로서 임의 파형 발생기 (NI PXI-5411), 오실로스코프 (NI PXI-5102), Multi-function I/O등으로

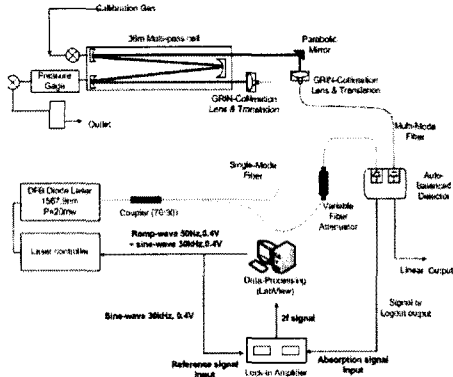


Fig 1. Schematic diagram of the DFB diode-based sensor system.

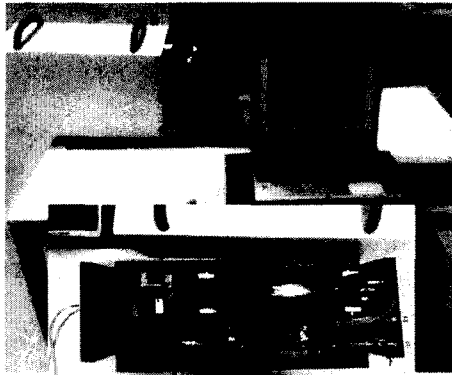


Fig 2. Picture of the diode-based sensor system.

구성하였다. 또한 광 부품들의 연결 편리성 및 현장 적용을 고려하여 광섬유 방식 (Optical fiber type)을 기반으로 하였다.

Detector (Auto-balanced detector: New Forcus 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.

Fig. 2는 다이오드 레이저 계측 시스템의 장치의 구성을 나타낸다. 다이오드 레이저 시스템은 Fig2.에서 보는 바와 같이 상단에 위치한 광학 부분 (Optic part)과 신호를 처리하고 분석하는 노트북 컴퓨터, 하단에 위

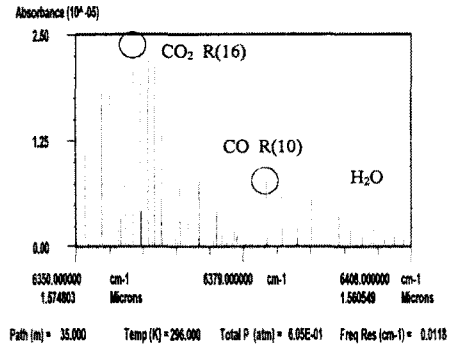


Fig 3. Calculated survey spectra of CO, CO₂, and H₂O in the 6350-6408 cm⁻¹ spectral region (296K) using the HITRAN-PC database.

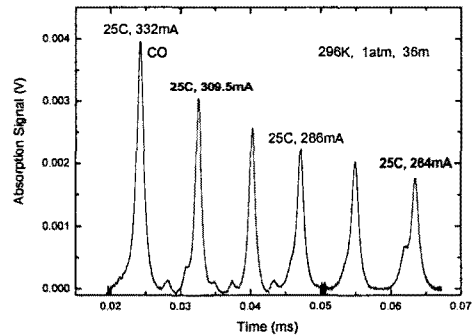


Fig 4. Measured CO survey spectra from near 1568.9 at 296K, 1atm.

치한 다이오드 레이저 컨트롤러 그리고 빛 DAQ 장비로 구성되어 있으며, 또한, 그 외에 WMS에 사용 되는 Lock-in Amplifier를 실험에 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 흡수 라인 선형

본 연구에서는 HITRAN Data-base를 이용하여, 대상가스 와 H₂O 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)}

Fig 3.과 4는 HITRAN에서 계산된 CO, CO₂, 와 H₂O의 Absorbance를 나타내고 있으며, fig 5.는 실제로 계측된 대상가스의 흡수 신호 (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 신호 및 2f 신호가 선택되어야만 한다. 본 연구에서는 CO를 계측 대상 가스로 정하고, 이 외에 다른 가스와의 간섭이 적으면서 흡수 신호가 가장 큰 R(10)를 선별하였다. Fig 6.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 25C, 286mA에 해당되는 흡수 신호이다.

Fig 6.은 CO의 파장별 2f 신호의 크기를 비교한 것으로, Fig 5.와 비교 하였을때, 흡수신호의 크기가 클수록 2f 신호의 크기가 증가함을 알 수 있다.

4.2 실험 조건

WMS (wavelength modulation spectroscopy) 계측 시에는 식 (1)과 Fig 1.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 같이 수행하였다.

변조 주파수의 크기를 실험적으로 확인하고, 가장 적합한 주파수를 선택하기 위해 사인파 (변조 주파수의 종류)를 20kHz부터 100kHz까지 변화 시키면서 2f (2차 도함수)신호의 크기를 비교하였다. 또한 변조 주파수의 크기는 사인파의 진폭 (Amplitude)을 변화시켜, 실험함으로써 최적의 조건을 결정하였다.

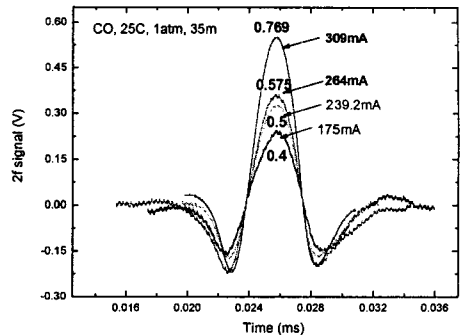


Fig 5. Size of 2f signal with different wavelength.

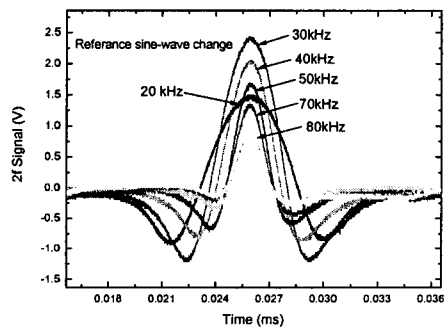


Fig. 6. Shape of 2f signal with different sine-wave frequency.

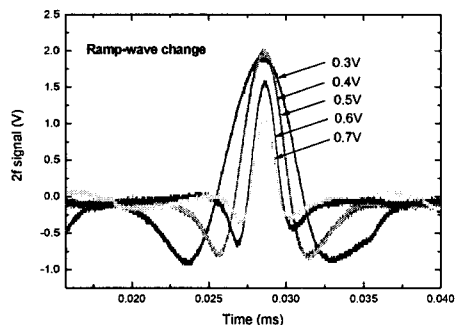


Fig 7. Shape of 2f signal with different sine-wave amplitude.

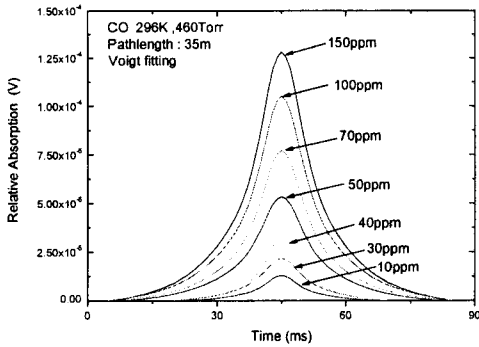


Fig 8. DA Absorption signal

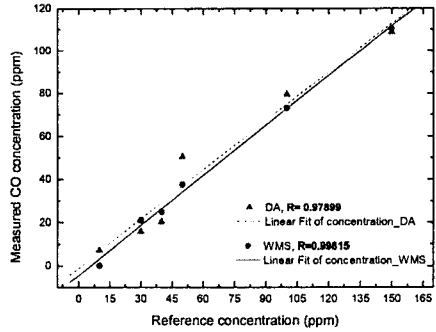


Fig 10. Comparison with Measured DA and WMS concentration (CO)

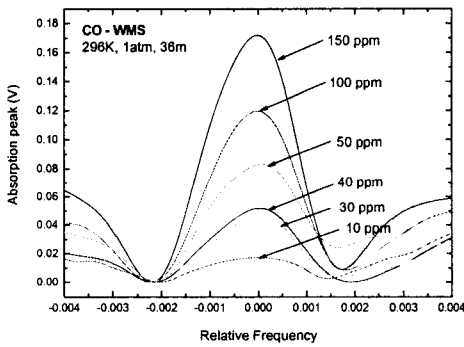


Fig 9. WMS Absorption signal

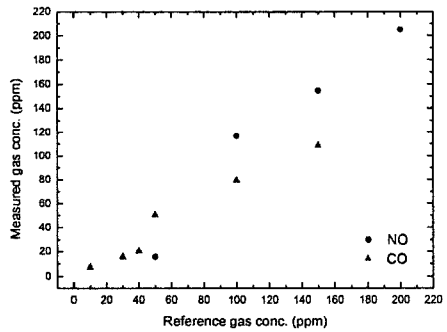


Fig 11. Measured concentration using Diode laser sensor (NO and CO)

Fig 7.은 변조 주파수인 사인파의 10kHz부터 100kHz까지의 변화에 따른 $2f$ (2차 도함수)의 크기를 비교한 것이다.

농도 계측 시 $2f$ 신호의 왼쪽 최저값과 최고값의 높이차에 의해 농도 값을 산출하므로 신호가 가장 크면서, 형상이 왼쪽과 오른쪽이 대칭인 사인파의 주파수 30kHz와 진폭 0.3V의 $2f$ 신호를 결정하였다.

4.3 결과 및 고찰

Fig. 8과9는 각각 직접 흡수 기법 (Direct Absorption Method)과 파장 변조 기법 (Wavelength Modulation Spectroscopy)의 흡수 신호를 비교한 것이다. 직접 흡수 기법의 경우 흡수 신호 영역의 적분된 값을 농도 산출 시 사용되므로, 신호의 불안정 및 잡음 (Noise)의

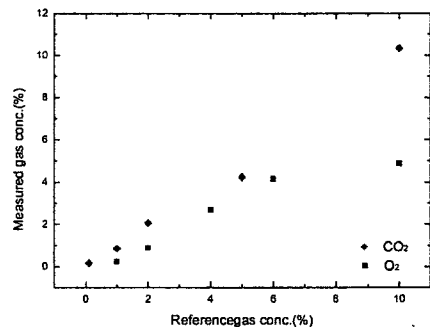


Fig 12. Measured concentration using Diode laser sensor (CO₂ and CO)

크기와 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 있다. 이것은 또한 정밀 계측과도 연관이 있어 중요한 부분이다.

Fig 10.은 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, 분석한 것이다. 두 그래프를 비교해 보면, 같은 조건 (296K, 1atm)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 10ppm 이하의 농도까지 계측 할 수 있었으나, 같은 조건 (296K, 1atm)에서 계측 시 직접흡수 기법은 70ppm까지 계측이 가능하였다.

Fig 11은 연소장에서 연소배기 가스 계측을 고려하여, ppm 단위로 계측되는 CO, NO를 표준 농도가스에 따라 Diode laser sensor로 계측된 농도 값을 나타내고 있으며, Fig. 12는 % 단위로 계측되는 CO₂, O₂를 계측한 결과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구는 파장 변조 기법 (Wavelength Modulation Absorption)을 적용한 파장 가변형 다이오드 레이저 계측 센서를 설계하고 계측하여, 직접 흡수 기법 (Direct Absorption)과의 비교를 통해 정확도와 오차 크기를 분석하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다

1. 파장 변조 기법을 채택하여 연소배기 가스를 계측 시 같은 조건하 (296K, 1atm)에서 변조 주파수와 진폭 그리고 2f 신호의 상이 정밀 계측에 중요 인자이며, 본 연구에서 가장 적합한 값은 변조 주파수, 사인파의 30kHz, 400mV임을 실험적으로 분석하였다.

2. 파장 변조 기법과 직접 흡수 기법을 표준 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 요구 되는 대상가스일 경우 파장변조 기법이 효과적임을 알 수 있다.

3. 연소배기 가스를 계측 할 경우 그 농도가 % 단위로 계측이 요구 되는 대상 가스는 직접 흡수 기법 (Direct Absorption Method)을 수 ppm 이하의 정밀 계측이 요구 되는 계측 일 경우 파장 변조 기법 (Wavelength Modulation Absorption)을 사용하는 것이 효과적이다.

4. 파장변조기법을 적용할 시 연소배기 가스 (CO, NO, CO₂, O₂)를 1ppm 이하 0.8ppm까지 $\pm 1\%$ -2%의 오차 이내로 계측이 가능함을 밝혔다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대 핵심 환경기술 개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Jae-hyun Ahn 2005 "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.
- (2) Dong-Hyuck Kim, Myung-Chul Shin, and Se-Won Kim 2006 "Multiplexing Measurement of CO and CO₂ concentration using DFB Diode Laser" KSME.
- (3) Cha, HakJoo, July 2004 "A Study on Measurement of Caarbon Dioxide Concentration Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy(TDLAS) System." The degree of Master of Mechanical Engineering, Yonsei University.
- (4) Radu M. Mihalcea, Douglas S. Baer, and Ronald K. Hanson, 1997 "Diode laser sensor

for measurements of CO, CO₂ and CH₄ in combustion flows" *Applied Optics* Vol, 36, No. 33 pp 8745 ~ 8752

(5) R. Engelbrecht, j. Euring, F. Kuntz, L.-P. Schmidt, 2001 "A Fiber-Optic Laser Spectrometer for Sensitive Simultaneous Measurement of CO₂ and CO Gas Concentration" 10. *Int. Fair and Conference, SENSOR 20018.-10.5.2000.*

(6) Radu Mihai Mihalcea, April 1999 " CO and CO₂ measurement in combustion environment using external cavity diode laser" *The committee on graduate studies of Stanford university.* pp1~69