

# 다이오드 레이저를 이용한 배기가스 O<sub>2</sub> 농도 및 온도 동시 측정에 관한 실험적 연구

김세원\* · 신명철\* · 이창엽\*\* · 윤성운\* · 김영일\*\*

## The Experimental Study on Simultaneous Measurements of O<sub>2</sub> Concentration and Temperature of Flue Gas Using a Single Diode Laser

Sewon Kim, Myoungchul Shin, Changyeop Lee, Sungwoon Youn and Young-Il Kim

### ABSTRACT

Simultaneous measurements of oxygen concentration and temperature using diode laser in the combustion environment are successfully accomplished. A single DFB type diode laser of 760 nm line centre frequency is used and the scanned-wavelength direct absorption spectroscopy method and wavelength modulation spectroscopy method are applied to measure absorption signals below 793 K temperature region. The experimental results show that oxygen concentration are measured within 1% accuracy and temperature are measured within 5% accuracy. This new method of simultaneous measurements of concentration and temperature with a single diode laser shows a great promise.

**Key Words** : Gas analyzer, Single diode laser, Direct Absorption Spectroscopy(DAS), Wavelength Modulation Spectroscopy(WMS), Oxygen concentration, Temperature

### 기 호 설 명

#### Alphabets

$T_v$  : Transmission coefficient  
 $k_v$  : Absorption coefficient  
 $I$  : Transmitted laser intensity  
 $I_o$  : Incident laser intensity  
 $L$  : Path length  
 $P$  : Pressure  
 $S$  : Linestrength  
 $x$  : Mole fraction  
 $a$  : Modulation amplitude  
 $T$  : Temperature  
 $t$  : Time  
 $H$  : Fourier coefficient  
 $Q$  : Molecular partition function  
 $h$  : Planck's constant  
 $c$  : Speed of light

$E''$  : Lower-state energy  
 $k$  : Boltzmann's constant

#### Greeks

$\nu$  : Wavelength  
 $\alpha$  : Absorbance  
 $\Phi$  : Lineshape function  
 $\omega$  : Modulation frequency

#### Subscripts

$i$  : Species i  
 $0$  : Initial  
 $\nu$  : Wavelength

#### Superscripts

$-$  : Mean value

## 1. 서론

과장 가변형 다이오드 레이저를 이용하여 가스를 계측하는 기법은 1980년 이후로 꾸준히 연구되어 왔다. 이 기법을 이용한 배기가스 측정 장치는 선적분 계측으로 가스 농도를 측정하므로 점계측을 하는

\* 한국생산기술연구원 에너지시스템연구그룹

\*\* 포항산업과학연구원 에너지자원연구본부

† 연락저자, cylee@kitech.re.kr

기타 가스 분석기에 비해 오차가 작다. 또한 이 가스 분석기는 레이저의 장점인 빠른 응답성을 가지므로 실시간 가스 농도 측정이 필요한 실제 산업 현장에서 각광받으며 빠르게 발전하고 있다[1-7].

파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광 기법은 배기가스의 농도뿐만 아니라 온도, 속도 및 압력 또한 측정 가능하다. 대부분의 온도 측정 연구에서는 배기가스 내 H<sub>2</sub>O의 흡수 신호를 측정하여 온도를 측정하는 방법이 주로 연구되어 왔다. 그 이유는 H<sub>2</sub>O의 흡수 천이 파장이 매우 넓고 다양하기 때문이다[8-10].

파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광 기법은 농도와 온도를 동시에 측정할 수 있기 때문에 여타 측정 방법에 비해 많은 장점을 가진다. 이때 측정하고자 하는 가스 고유의 흡수 천이 파장과 H<sub>2</sub>O의 흡수 천이 파장을 함께 사용한다. 지금까지 진행되어온 대부분의 연구들은 산소 농도를 측정하기 위해서 760 nm 근방의 흡수 천이 파장을 사용하였으며[11-14], 온도를 측정하기 위하여 H<sub>2</sub>O의 흡수 천이 영역인 1300 nm 근방의 파장을 사용하였다.

이와 같이 온도와 산소 농도를 동시에 측정하기 위하여 파장대가 크게 차이나는 두 개 이상의 다이오드 레이저를 사용하는 것이 현재 연구들의 결과이다 [15]. 이렇게 파장 차이가 크게 나는 두 개 이상의 다이오드 레이저를 사용할 경우 실험 장비가 복잡해지며 노이즈 발생 확률이 높아져 측정 값의 정확도가 떨어지게 된다.

본 연구에서는 760 nm를 중심파장으로 하는 하나의 DFB type 다이오드 레이저를 이용하여 산소 농도 및 온도를 동시에 측정하는 방법에 대하여 고찰하였다.

## 2. 흡수 분광학 이론

분자가 진동 또는 회전과 같은 다양한 모드의 운동을 함으로써 에너지 천이가 일어난다. 운동 모드에 따라 에너지 흡수가 일어나는 광 주파수가 결정되며, 이에 따라 각 분자의 고유한 분광학적 특성이 결정된다. 이러한 가스의 분광학적 특성을 바탕으로 가스의 농도, 온도, 속도, 압력 등을 측정하는 흡수 분광학은 Beer-Lambert 법칙으로 간단하게 정의되며 이 정의에 따라 다양한 기법이 연구되고 있다.

### 2.1. Beer-Lambert 법칙

Fig. 1은 흡수 분광 기법의 기본 개략도이다. 측정 가스가 에너지를 흡수하는 파장대의 다이오드 레이저를 측정 가스에 투과시킨다. 측정 가스를 투과하기 전 다이오드 레이저 강도( $I_0$ )와 비교하여 측정 가스로부터 에너지 흡수가 일어난 후의 다이오드 fp

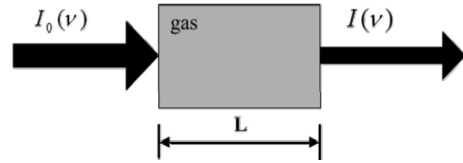


Fig. 1. Schematic of typical absorption measurements.

이저 강도 ( $I$ )는 에너지 흡수 정도에 따라 그 값이 달라진다. 이들 강도 비는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$T_\nu \equiv \left( \frac{I}{I_0} \right)_\nu = \exp(-k_\nu \cdot L) \quad (1)$$

위 식을 Beer-Lambert 법칙이라고 한다. 여기서  $I$ 는 투과 신호 강도,  $I_0$ 는 기준 신호 강도라고 한다.  $L[cm]$ 은 광학 흡수 길이이다. 흡수 계수,  $k_\nu[cm^{-1}]$ 는 다음과 같다.

$$k_\nu = P \cdot x_i \cdot \Phi_\nu \cdot S(T) \quad (2)$$

$x_i$ 는  $i$ 종 가스의 몰분율이다. 전체 압력,  $P[atm]$ 과 선강도,  $S(T)[cm^{-2}atm^{-1}]$ 는 실험 조건에 따른 고정된 값이다. 선강도는 온도만의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T)}{Q(T_0)} \exp \left[ -\frac{hcE''}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left[ \frac{1 - \exp(hc\nu/kT)}{1 - \exp(hc\nu/kT_0)} \right] \quad (3)$$

식 (2)에서 선형태 함수,  $\Phi_\nu[cm]$ 는 선폭 넓어짐을 표현하는 함수이다. 선폭 넓어짐은 이론적인 흡수 천이 파장 주변에서도 에너지 흡수가 일어나는 현상이다. 이는 압력이나 온도에 따라 측정 가스의 흡수 천이 파장의 범위가 주변으로 확대되기 때문에 발생한다. 대개 흡수 천이 파장을 기준으로 종형 분포 모양을 이룬다. 선폭 넓어짐은 원인에 따라 Gaussian 선형태 함수, Lorentzian 선형태 함수, 혹은 Voigt 선형태 함수로 표현한다. 이들 함수는 흡수 신호를 가장 유사하게 표현하는 함수이며, 실제 흡수 신호와 일치하지 않는다.

선형태 함수의 넓이는 다음과 같이 표준화되어 사용한다.

$$\int_\nu \Phi_\nu \, d\nu = 1 \quad (4)$$

## 2.2. 농도 및 온도 측정 방법

본 연구에서는 scanned-wavelength 직접 흡수 분광 기법과 파장 변조 분광 기법을 이용하여 온도 및 농도를 계측하였다. 일반적으로 scanned-wavelength 직접 흡수 분광 기법을 간단하게 직접 흡수 분광 기법이라고 명한다.

기준 신호 강도와 흡수 신호 강도 비는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\alpha_\nu &\equiv \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_\nu = -k_\nu \cdot L \\ &= -P \cdot x_i \cdot \Phi_\nu \cdot S(T) \cdot L\end{aligned}\quad (5)$$

직접 흡수 분광 기법을 이용하여 흡광도,  $\alpha_\nu$ 를 구할 수 있다.

Fig. 2는 흡광도 그래프이며 그림과 같이 종형 모양으로 나타난다. 식 (5)를 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}A &= \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_\nu \cdot d\nu = -P x_i S(T) L \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_\nu \cdot d\nu \\ &= -P x_i S(T) L\end{aligned}\quad (6)$$

Fig. 2에서 흡광도 그래프의 적분 값, A는 식 (6)과 같다. 직접 흡수 분광 기법은 실험값 A와 실험 세팅 조건인 온도 및 전체 압력 그리고 광학 흡수 길이를 이용하여 측정 가스의 물분율을 구한다.

직접 흡수 분광 기법에서 레이저의 파장을 미세하게 변화시키기 위하여, 주입 전류를 삼각 파형 혹은 램프 파형으로 입력하여 레이저를 컨트롤한다. 파장 변조 분광 기법은 이러한 삼각 파형 혹은 램프 파형에 주기 함수를 합성하여 주입 전류가 주기를 가지도록 한다. 이렇게 주기를 가지는 주입 전류는 레이저의 강도 및 파장도 주기를 가지게 한다.

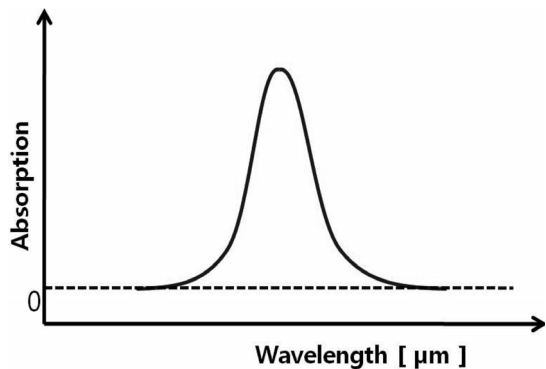


Fig. 2. Absorbance Signal for a direct absorption scan.

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cdot \cos(\omega_m t) \quad (7)$$

식 (7)은 파장 변조 분광 기법에서 다이오드 레이저의 파장이 식과 같이 주기를 가진다는 것을 보여준다. 여기서  $\bar{\nu}$ 는 평균 파장이며 삼각 파형 혹은 램프 파형이 된다. 흡수 천이 파장이 주기를 가지므로 기준 신호 강도와 흡수 신호 강도 비 또한 주기 함수로 표현된다. 그러므로 강도 비는 다음과 같이 Fourier 급수로 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}T_\nu &= T(\bar{\nu}(t) + a \cdot \cos(\omega_m t)) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, a) \cos(k\omega_m t)\end{aligned}\quad (8)$$

식 (8)에서 Fourier 상수,  $H_k$ 는 일반적으로 식 (9)와 식 (10)으로 표현된다.

$$H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} T(\bar{\nu} + a \cdot \cos\theta) d\theta \quad (9)$$

$$H_k(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} T(\bar{\nu} + a \cdot \cos\theta) \cos k\theta d\theta \quad (k > 1) \quad (10)$$

파장 변조 분광 기법은 일반적으로  $k_\nu \cdot L \leq 0.05$  일 경우, 특히 물분율이 매우 작거나 혹은 광학 흡수 길이가 매우 작아 직접 흡수 분광 기법으로 측정하기 힘들 경우 사용된다. 그러므로 식 (1)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$T_\nu = \exp(-k_\nu \cdot L) \approx 1 - k_\nu \cdot L \quad (11)$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하여 식 (12)와 같이 정리할 수 있다.

$$H_k(\bar{\nu}, a) = -\frac{SPx_i L}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \Phi(\bar{\nu}, a) \cos k\theta d\theta \quad (12)$$

파장 변조 분광 기법에서는 식 (12)와 같이 Fourier 상수 값을 이용하여 물분율을 구할 수 있다. 수많은 Fourier 상수들 중에서  $H_2$  값을 이용하는데 그 이유는 크게 두 가지이다[12].  $H_2$  값과 관련 있는 2차 조화 함수 신호(2 f signal)가 좌우 대칭 함수이기 때문이며 다음으로는 좌우 대칭 함수들(2, 4, 6 f, ...)중에서 2 f 신호의 강도가 가장 크기 때문이다.

선강도는 앞서 설명하였듯이 온도만의 함수이다. 때문에 선강도를 이용하면 온도를 구할 수 있다. 식

(3)에서 선강도는 온도에 대하여 비선형 방정식이다.

$$\frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp \left[ \frac{hc(E_2'' - E_1'')}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (13)$$

식 (13)과 같이 한 쌍의 선강도 비를 이용하면 복잡한 비선형 함수를 간단한 분수 함수로 만들 수 있다. 이 식을 이용하여 온도를 쉽게 계산할 수 있다. 직접 흡수 분광 기법의 경우는 선강도가 A에 비례하며, 파장 변조 분광 기법에서는 선강도가 H<sub>2</sub>에 비례한다. 그러므로 서로 다른 흡수 천이 파장들의 흡수 신호를 구한다면 온도를 측정할 수 있다.

### 3. 레이저 선정 및 실험 장치 구성

#### 3.1. 흡수 천이 파장 선정

하나의 다이오드 레이저를 이용하여 산소 농도와 온도를 동시에 측정하기 위해서는 흡수 천이 파장의 선정이 매우 중요하다. 동시에 한 쌍의 흡수 신호를 측정하기 위해서는 여섯 가지 조건을 만족하는 한 쌍의 흡수 천이 파장을 선정하여야 한다[11]. 흡수 천이 파장을 선정하는 과정에 HITRAN2008[15]을 이용하였다.

HITRAN2008을 바탕으로 2~2000 nm 파장 범위 사이에서 1314개의 산소 흡수 천이 파장을 구하였다. 이들 중 다음의 여섯 가지 조건을 충족하는 흡수 천이 파장 한 쌍을 선정하였다.

첫째, 측정 온도 범위 내에서 알맞은 흡수 신호 크기를 가지는 파장을 선별해야 한다. 흡수 신호가 너무 크거나 너무 작으면 오차가 커지거나 신호 측정이 불가능해 진다. 흡수 신호의 크기는 흡광도 값이 기준이 된다. 흡광도의 최고값은 앞서 설명한 가정처럼 0.05로 정하며 최저값은 노이즈를 고려하여 10<sup>-3</sup>로 정하였다. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_{\nu,peak} = S(T) P x_{O_2} L \Phi_{\nu,peak} \\ = S(T) (1atm)(1\%)(160cm) \Phi_{\nu,peak} \geq 10^{-3} \quad (14)$$

$$\alpha_{\nu,peak} = S(T) P x_{O_2} L \Phi_{\nu,peak} \\ = S(T) (1atm)(21\%)(160cm) \Phi_{\nu,peak} \leq 0.05 \quad (15)$$

측정 온도 범위에서 식 (14)와 식 (15)를 만족하는 흡수 천이 파장 34개를 선별하였다.

둘째, 저준위 상태 에너지 값이 250(cm<sup>-1</sup>) 이상인 흡수 천이 파장을 선별하였다. 식 (3)에서 저준위 상

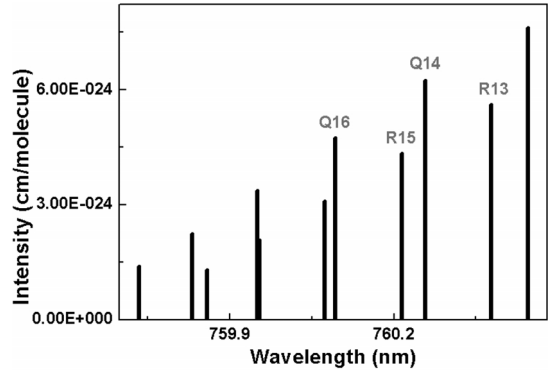


Fig. 3. Intensity of O<sub>2</sub> in the 759.95 nm to 760.5 nm spectral region at 296 K.

태 에너지, E''가 클수록 상온의 선강도, S(T<sub>0</sub>)의 영향이 줄어든다. 그러므로 공기 펄징과 같이 실험 장치로 들어오는 상온의 산소가 흡수하는 에너지로 인한 발생하는 실험 오차를 최소화 할 수 있다. 이 조건에 맞는 20개의 파장을 선별하였다.

셋째, 한 쌍의 흡수 천이 파장 차이가 1(cm<sup>-1</sup>) 이내인 흡수 신호 한 쌍을 선별한다. 파장 차이가 1(cm<sup>-1</sup>) 이상일 경우 하나의 다이오드 레이저로 동시에 두 흡수 신호를 측정하기 어렵다.

넷째, 저준위 상태 에너지의 차가 80(cm<sup>-1</sup>) 이상인 흡수 천이 파장 한 쌍을 선별하였다. 에너지의 차가 클수록 식 (13)과 같이 온도 측정 민감도가 증가하기 때문이다.

다섯째, 두 흡수 신호 사이에는 서로 간섭 현상이 일어나지 않는 한 쌍의 흡수 천이 파장을 선별한다. 간섭이 일어날 경우 흡광도 넓이 계산을 할 수 없기 때문이다.

마지막으로 다이오드 레이저의 상용화를 고려하여 600~1,700 nm 범위의 흡수 천이 파장을 선별하였다.

이들 여섯 가지 단계를 거쳐서 최종적으로 한 쌍의 흡수 천이 파장을 선정하였다.

Fig. 3에서 760.26 nm(Q14)와 760.21 nm(R15)가 최종적으로 선정된 흡수 천이 파장 한 쌍이다.

#### 3.2. 실험 장비 구성

Fig. 4는 실험 장비의 개략도이다. 먼저 파형 발생기(Function generator)에서 원하는 파형을 만든다. 직접 흡수 분광 기법의 경우에는 주입 전류를 미세하게 변화시키기 위해 삼각파 혹은 램프파를 발생시키며, 파장 변조 분광 기법의 경우 램프파와 주기 함수인 사인파를 합성시킨 합성파를 발생시킨다. 이렇게 발생된 파형은 레이저 컨트롤러로 들어가 다이오드 레이저의 주입 전류를 변화시킨다. 레이저 컨트롤러에 의해 발진된 다이오드 레이저의 파장은 760.21 nm와

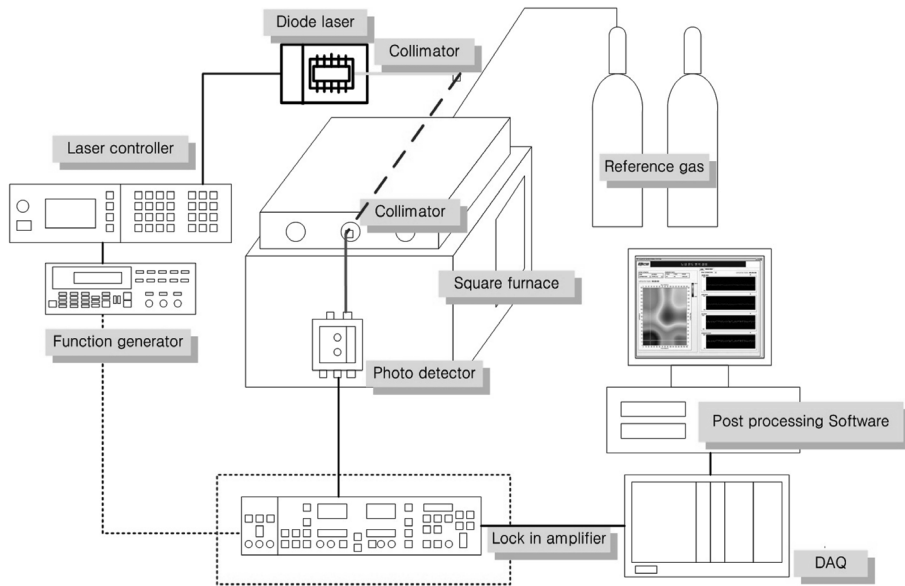


Fig. 4. Schematic diagram of measurement system.

760.26 nm를 모두 지나면서 미세하게 변화한다. 실제 배기 덕트와 같은 크기의 사각로를 지난 다이오드 레이저는 에너지 흡수가 일어나게 되고 광검출기(Photo detector)를 이용하여 흡수 정도를 측정한다. 직접 흡수 분광 기법의 경우에는 흡수 신호가 곧바로 DAQ를 통해 컴퓨터에 전달되어 후처리를 하게 되며, 파장 변조 분광 기법의 경우 락인 증폭기(Lock-in amplifier)를 통해 흡수 신호로부터 추출된 2 f 흡수 신호가 DAQ를 통해 컴퓨터에 전달되고 후처리 과정을 거친다.

측정 가스는 검증된 질소 혼합 가스를 사용하였다. 측정 혼합 가스로 calibration된 산소 계측기를 이용하여 사각로 내 산소 농도를 측정된 값들의 평균값을 실험값과 비교하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1. 농도에 따른 흡수 신호 계측

직접 흡수 분광 기법의 경우 흡수 천이 파장 760.21 nm에서 흡수 신호가 미약하였다. 때문에 산소 농도가 21%인 경우를 제외한 저농도 조건 및 고온에서의 흡수 신호를 측정하는 것이 불가능하였다. 흡수 천이 파장 760.26 nm에서는 모든 조건에서 흡수 신호를 측정할 수 있었고 그 결과는 Fig. 5에서 7과 같다. 직접 흡수 분광 기법에서 흡수 신호는 컴퓨터 후처리 과정을 거쳐서 Voigt fitting한 결과 그래프로 나타내었다.

Fig. 5에서 7은 각각 319 K, 683 K, 그리고 803 K에서 농도에 따른 흡광도 그래프이다. 각각의 그래프

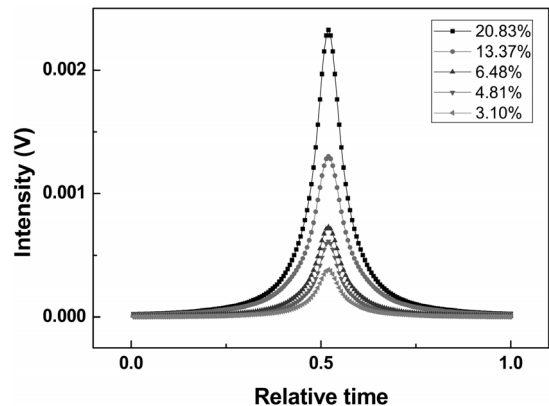


Fig. 5. Absorbance of O<sub>2</sub> at 319 K using DAS(1 atm, path length : 160 cm).

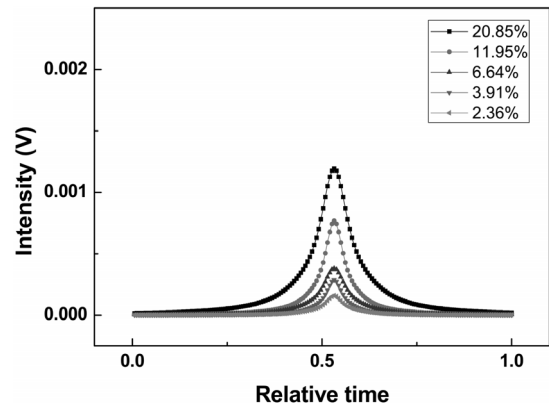


Fig. 6. Absorbance of O<sub>2</sub> at 683 K using DAS(1 atm, path length : 160 cm).

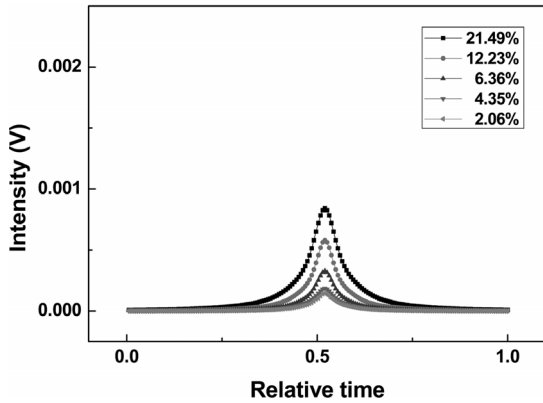


Fig. 7. Absorbance of O<sub>2</sub> at 803 K using DAS(1 atm, path length : 160 cm).

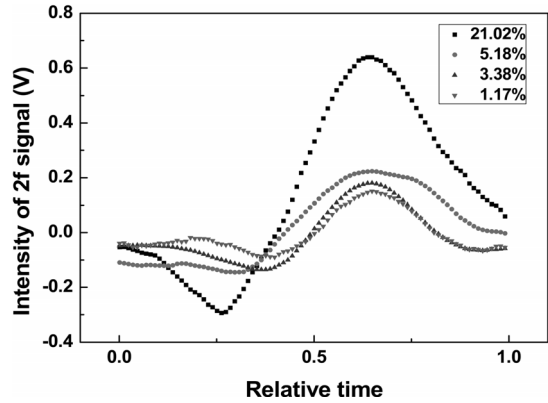


Fig. 9. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub> at 604 K using WMS (1 atm, path length : 160 cm).

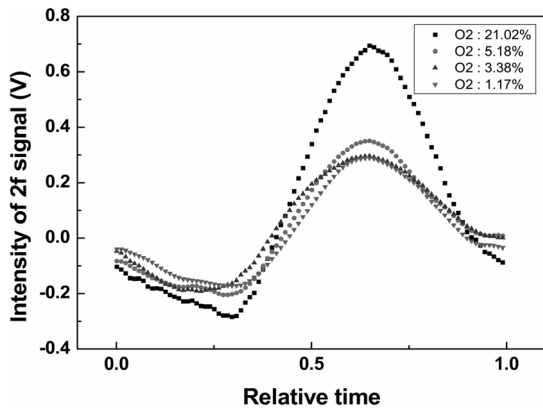


Fig. 8. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub> at 301 K using WMS (1 atm, path length : 160 cm).

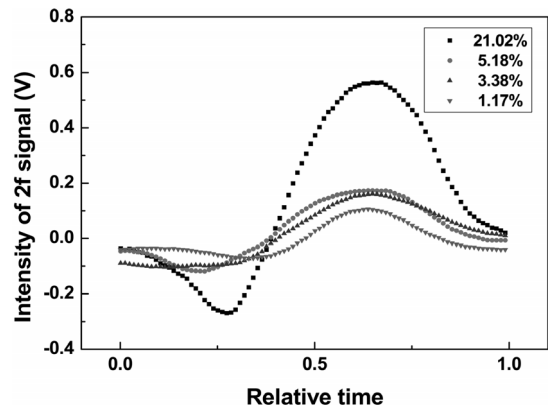


Fig. 10. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub> at 793 K using WMS (1 atm, path length : 160 cm).

에서 농도가 커질수록 흡수 신호도 커지는 것을 알 수 있다. 이는 에너지를 흡수하는 가스 분자가 많아질수록 해당 파장의 광에너지를 흡수하는 양이 많아지기 때문이다.

직접 흡수 분광 기법과 달리 파장 변조 분광 기법은 흡수 천이 파장 760.21 nm에서도 흡수 신호 측정이 가능하였다. 파장 변조 분광 기법을 활용하여 흡수 천이 파장 760.21 nm에서 흡수 신호를 측정하였으며 Fig. 8에서 10은 결과 그래프들이다.

Fig. 8에서 10은 각각 301 K, 604 K, 그리고 793 K에서 산소 농도에 따른 결과 그래프이다. 이들 결과 값은 락인 증폭기를 통과한 흡수 신호가 2 f 신호로 변환되어 나온 결과이다. 농도가 증가할수록 그래프의 높이가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 직접 흡수 분광 기법과 마찬가지로 에너지를 흡수하는 산소 분자가 증가할수록 흡수 신호가 커지며 이로 인해 Fourier 급수의 상수 값 또한 커지기 때문으로 사료된다.

Fig. 8에서 산소 농도 5.18%일 때 2 f 흡수 신호의 높이가 0.633 V이며 3.38%일 때 0.589 V, 마지막으로

로 1.17%일 때 2 f 흡수 신호의 높이가 0.517 V이다. Fig. 9에서 2 f 신호의 높이가 각각 0.461 V(산소 농도 5.18%), 0.415 V(산소 농도 3.38%), 0.344 V(산소 농도 1.17%)로 측정되었다. 마지막으로 Fig. 10에서는 산소 농도 5.18, 3.38, 1.17%일 때 2 f 신호의 높이가 각각 0.349 V, 0.302 V, 0.243 V로 측정되었다.

#### 4.2. 온도에 따른 흡수 신호 계측

Fig. 11에서 13은 760.26 nm 파장 영역에서 직접 흡수 분광 기법을 이용한 온도에 따른 흡수 신호 결과이다. Fig. 11은 평균 산소 농도 6.5%에서 온도에 따른 흡수 신호 결과이다. Fig. 12는 평균 산소 농도 4.6%에서 온도에 따른 흡수 신호 결과이다. 마지막으로 Fig. 13은 평균 산소 농도 2.5%에서 온도에 따른 흡수 신호 결과이다. 각각의 결과 그래프를 살펴보면 온도가 높아짐에 따라 흡수 신호의 높이가 작아지며, 동시에 선폭이 넓어짐을 볼 수 있다. 이는 온도 상승에 따라 선폭 넓어짐 형상이 커지는 분광학적 특성을 보여주는 결과이다.

다음은 파장 변조 분광 기법을 이용하여 측정된 특정 산소 농도에서 온도에 따른 2 f 흡수 신호의 결과

들이다. Fig. 14에서 16은 각각 산소 농도 5.18, 3.38, 1.17%에서 온도에 따른 2 f 흡수 신호를 측정된 결

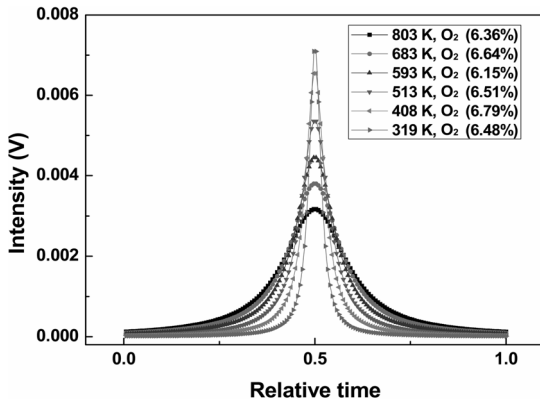


Fig. 11. Absorbance of O<sub>2</sub> in the 319 K to 803 K temperature region using DAS(1 atm, path length : 160 cm).

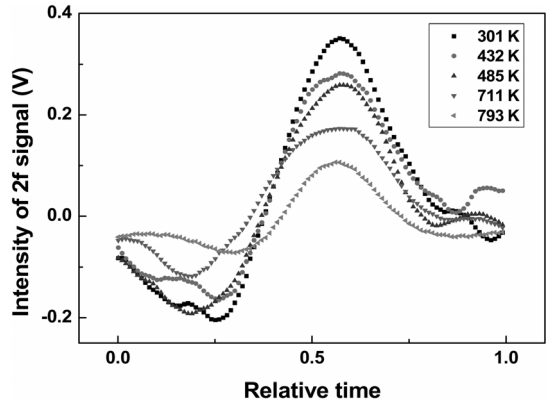


Fig. 14. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub>(5.18%) in the 301 K to 793 K temperature region(1 atm, path length : 160 cm).

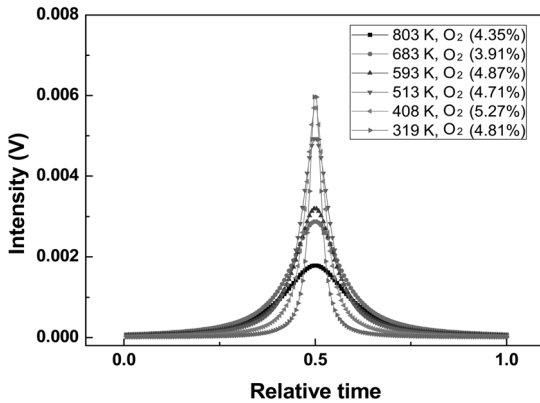


Fig. 12. Absorbance of O<sub>2</sub> in the 319 K to 803 K temperature region using DAS(1 atm, path length : 160 cm).

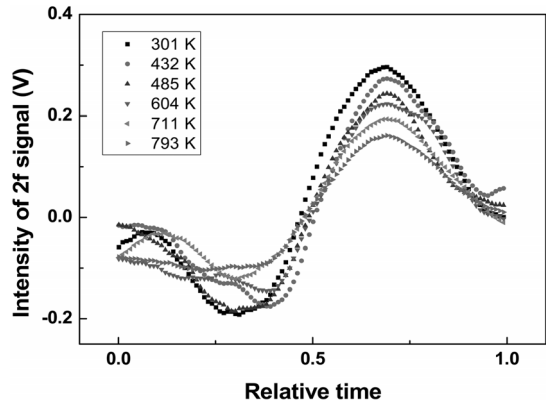


Fig. 15. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub>(3.38%) in the 301 K to 793 K temperature region(1 atm, path length : 160 cm).

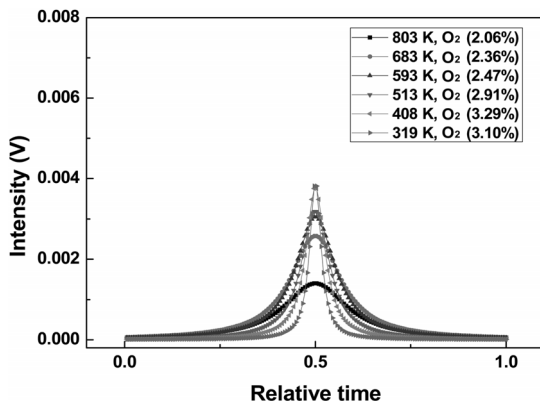


Fig. 13. Absorbance of O<sub>2</sub> in the 319 K to 803 K temperature region using DAS(1 atm, path length : 160 cm).

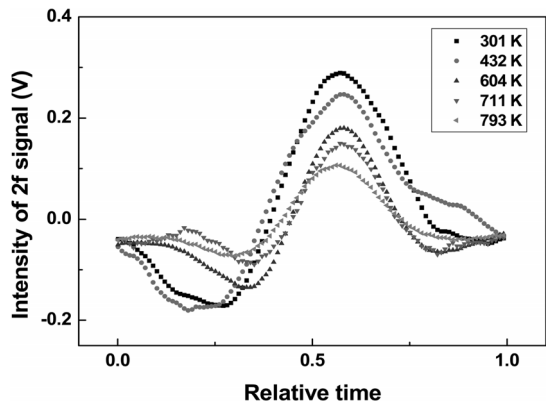


Fig. 16. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub>(1.17%) in the 301 K to 793 K temperature region(1 atm, path length : 160 cm).

과 그래프이다. 온도가 높아짐에 따라 2 f 흡수 신호의 높이는 줄어들고 선폭 넓어짐 현상이 커진다는 것을 앞선 직접 흡수 분광 기법 실험 결과를 통해 확인하였다. 그러므로 락인 증폭기를 통해 변환된 2 f 흡수 신호의 높이 역시 작아지는데 이는 흡수 신호가 작아짐에 따라 Fourier 급수의 상수 값 역시 작아지기 때문이다.

Fig. 14에서 온도가 301 K일 때 흡수 신호의 높이는 0.633 V이며 온도가 793 K일 때 2 f 흡수 신호의 높이는 0.349 V이다. 온도가 100 K 상승할 때마다 흡수 신호의 높이는 0.05 V에서 0.07 V씩 줄어들었다. Fig. 15에서 온도가 301 K, 793 K일 때 2 f 흡수 신호의 높이는 각각 0.589 V, 0.302 V로 측정되었다. 온도가 100 K 상승할 때마다 흡수 신호의 높이는 0.04 V에서 0.055 V씩 줄어드는 것을 확인하였다. 마지막으로 Fig. 16에서 온도가 301 K일 때 0.517 V, 온도가 793 K일 때 0.243 V의 2 f 흡수 신호의 높이를 측정하였다. 온도가 100 K 증가할 때마다 흡수 신호의 높이는 0.37 V에서 0.51 V씩 줄어드는 것을 알 수 있다.

### 4.3. 온도 계측

온도 계측은 실제 배기가스에서 많이 측정되는 산소 농도인 3%대와 5%대에서 계측하였다. 온도 계측을 하기 위해서는 한 쌍의 흡수 신호가 필요하다. 직접 흡수 분광 기법의 경우 선정된 760.26 nm의 흡수 선이 파장에서는 앞선 결과와 같이 흡수 신호 결과를 도출할 수 있었지만 나머지 한 파장인 760.21 nm에서는 흡수 신호를 찾기가 어려웠다. 때문에 본 연구에서는 동시 한 쌍의 흡수 신호를 측정할 수 있는 파장 변조 분광 기법을 이용하여 693 K에서 793 K까지 20 K 간격으로 온도를 계측하였다.

Fig. 17에서 19는 산소 농도 4.56%에서 온도를 계측한 결과 그래프이다. Fig. 17은 흡수 선이 파장 760.26 nm에서의 2 f 흡수 신호이고, Fig. 18은 흡수 선이 파장 760.21 nm에서의 2 f 흡수 신호이다. 앞선 결과와 마찬가지로 온도가 높아짐에 따라 2 f 신호가 낮아지는 경향을 보인다. 그러나 각 파장에서의 온도 변화에 따른 2 f 신호 변화율은 다르다. 이러한 차이에 의해 각 온도에서 두 파장의 2 f 신호 강도 비는 Fig. 19와 같이 다른 값을 나타내게 되며, 2 f 흡수 신호의 강도 비를 온도 산출에 활용할 수 있게 된다.

Fig. 17에서 2 f 흡수 신호의 높이는 693 K에서 0.89 V이며, 793 K에서 0.785 V 값이 측정되었다. 온도가 20 K 상승할 때마다 0.02 V에서 0.03 V씩 높이가 줄어드는 경향을 보였다. Fig. 18에서 2 f 흡수 신호의 높이는 693 K에서 0.78 V이고, 793 K에서 0.676 V 값이 측정되었다. 온도가 20 K 상승할 때마다 0.015

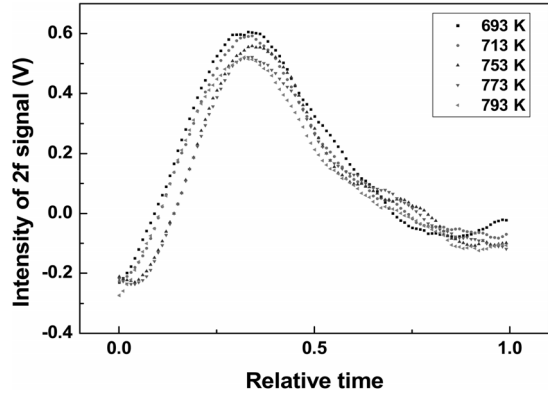


Fig. 17. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub>(4.56%) in the 693 K to 793 K temperature region(1 atm, Wavelength : 760.26 nm, path length : 160 cm).

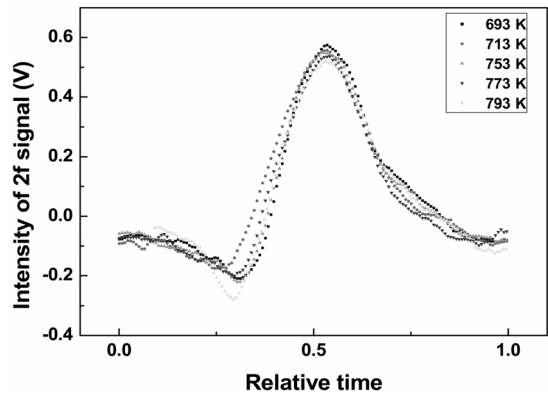


Fig. 18. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub>(4.56%) in the 693 K to 793 K temperature region(1 atm, Wavelength : 760.21 nm, path length : 160 cm).

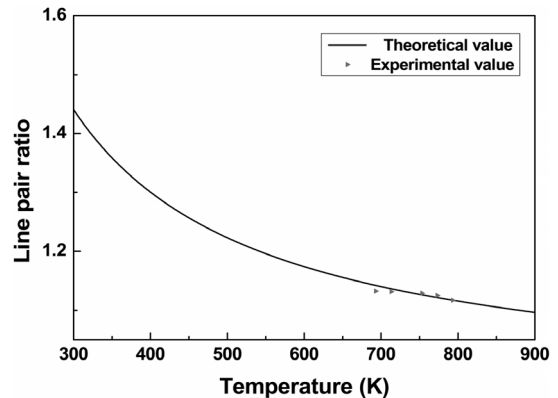


Fig. 19. The ratio of the 2 f peak height on two different transitions(O<sub>2</sub> : 4.56%).

V에서 0.016 V씩 높이가 줄어드는 것을 알 수 있었다. Fig. 19는 온도에 따른 한 쌍의 2 f 흡수 신호 높이 비를 이론값[13]과 비교한 그래프이다. 이론값과



비교하여 3% 이내의 오차를 가지는 것을 알 수 있었다.

다음은 산소 농도 2.93% 대에서 온도를 측정할 결과 그래프들이다. Fig. 20은 흡수 천이 파장 760.26 nm에서의 2 f 흡수 신호이고, Fig. 21은 흡수 천이 파장 760.21 nm에서의 2 f 흡수 신호이다.

Fig. 20에서 2 f 흡수 신호의 높이는 693 K에서 0.86 V이며 793 K에서 0.755 V이다. 온도가 20 K 상승할 때마다 0.02 V에서 0.03 V씩 높이가 줄어드는 것을 확인하였다. Fig. 21에서는 2 f 흡수 신호의 높이가 693 K에서 0.753 V, 그리고 793 K에서 0.676 V로 측정되었다. 그리고 온도가 20 K씩 상승할 때마다 0.013 V에서 0.014 V씩 높이가 줄어드는 것을 알 수 있었다. Fig. 22는 앞서 구한 두 2 f 흡수 신호들의 높이 비를 이론값[13]과 비교한 그래프이다. 이론값과 비교하여 5% 이내의 오차를 가지는 것을 알 수 있었다.

마지막으로 Fig. 23은 k 타입 열전대를 이용하여 측정한 온도와 파장 변조 분광 기법을 이용하여 구한

온도 값을 비교한 그래프이다. K 타입 열전대와 비교하여서 온도 값이 2% 오차 범위 내에서 일치하는 것을 그래프를 통해 알 수 있다.

### 5. 결론

하나의 다이오드 레이저를 이용하여 산소 농도 및 배기구 내 온도를 측정하였다. 직접 흡수 분광 기법 및 파장 변조 분광 기법이 적용되었다.

직접 흡수 분광 기법의 경우, 흡수 천이 파장이 760.26 nm일 때 산소 농도 1%의 낮은 농도 조건 그리고 700 K 이상의 고온 조건에서도 흡수 신호를 측정할 수 있다. 흡수 천이 파장이 760.21 nm인 경우에는 광학 흡수 길이가 160 cm로 비교적 짧은 현 실험조건에서 산소농도 11% 이하의 저농도 조건이나, 500 K 이상의 고온 조건에서의 흡수 신호는 측정이 어려웠다.

직접 흡수 분광 기법과는 달리 파장 변조 분광 기

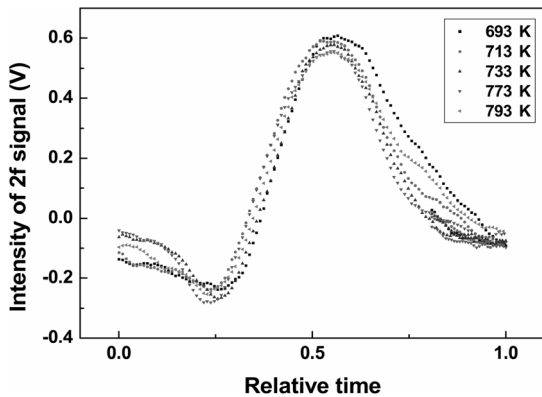


Fig. 20. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub>(2.93%) in the 693 K to 793 K temperature region(1 atm, Wavelength : 760.26 nm, path length : 160 cm).

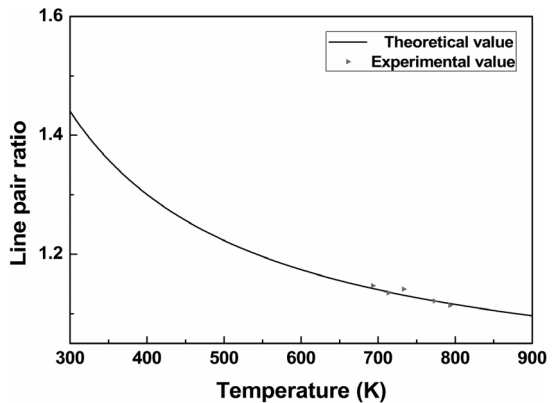


Fig. 22. The ratio of the 2 f peak height on two different transitions(O<sub>2</sub> : 2.93%).

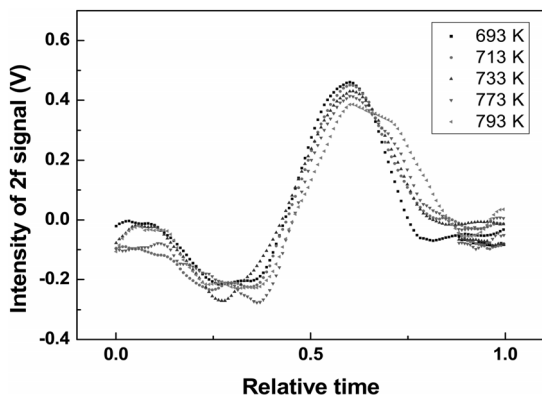


Fig. 21. Intensity of 2 f signal of O<sub>2</sub>(2.93%) in the 693 K to 793 K temperature region(1 atm, Wavelength : 760.21 nm, path length : 160 cm).

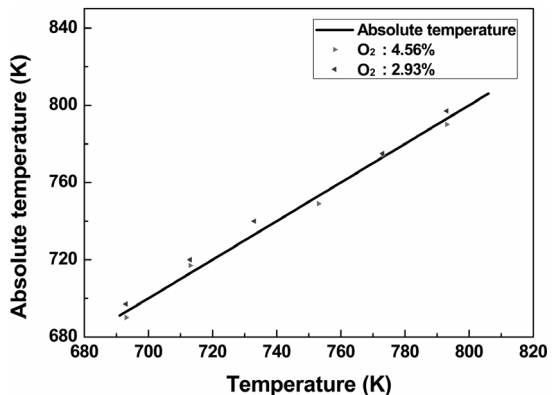


Fig. 23. Comparison temperature with k-type thermocouple.

법은 흡수 천이 파장이 760.26 nm인 파장대 영역뿐만 아니라 광흡수 신호가 작은 흡수 천이 파장이 760.21 nm인 파장대 영역에서도 모든 실험 조건에서 2 f 흡수 신호의 계측이 가능하였다. 특히 측정 온도가 약 800 K 부근 조건에서도 흡수 신호를 측정할 수 있어, 측정 범위의 한계를 보다 확대할 수 있었다.

파장 변조 분광 기법에서 중심파장이 760 nm인 하나의 다이오드 레이저를 이용하여 가스의 온도를 계측하였다. 산소 농도 범위가 3%에서 5%인 실험조건에서 각각 계측된 한 쌍의 흡수 신호의 비를 이용하여 온도를 계측하였으며, 측정값은 이론값과 비교하여 3~5% 내외의 오차를 나타내었다. 열전대를 이용한 실험값과도 2% 내외의 오차를 보여 비교적 정확한 온도 값의 계측이 가능하였다.

## 후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20101020100170).

## 참고문헌

- [1] E. D. Hinkley and P. L. Kelley, "Detection of air pollutants with tunable diode lasers", *Science* Vol. 171, 1971, 635-639
- [2] R. K. Hanson and P. K. Falcone, "Temperature measurement technique for high temperature gases using a tunable diode laser", *Appl. Opt.* Vol. 17, 1978, 2477-2480
- [3] M. Lackner, "Tunable diode laser spectroscopy(TD LAS) in the process industries-a review", *Rev. Chem. Eng.* Vol. 23, No. 65, 2007
- [4] P. A. Martin, "Near-infrared diode laser spectroscopy in chemical process and environmental air monitoring", *Chem. Soc. Rev.* Vol. 31, 2002, 201-210
- [5] P. Werle, "A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors", *Spectrochim. Acta.* Vol. 54, 1998, 197-236
- [6] M. G. Allen, "Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 9, 1998, 545-562
- [7] R. K. Hanson and J. B. Jeffries, "Diode laser sensors for ground testing", *Spectrochim. Acta*, 2006, 2006-3441
- [8] M. P. Arroyo and R. K. Hanson, "Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAs laser", *Applied Optics*, Vol. 32, 1993, 6104-6116
- [9] D. S. Baer, M. E. Newfield, N. Gopaul, and R. K. Hanson, "Multiplexed diode-laser sensor system for simultaneous H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, and temperature measurements", *Optics Letters*, Vol. 19, 1994, 1900-1902
- [10] J. T. C. Liu, J. B. Jeffries, and R. K. Hanson, "wavelength modulation absorption spectroscopy with 2 f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows", *App. Phys. B*, Vol. 78, 2004, 503-511
- [11] X. Zhou, X. Liu, J. B. Jeffries, and R. K. Hanson, "Development of a sensor for temperature and water concentration in combustion gases using a single tunable diode laser", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 14, 2003, 1459-1468
- [12] L. C. Philippe and R. K. Hanson, "Laser diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows", *Applied Optics*, Vol. 32, 1993, 6090-6103
- [13] J. A. Silver and D. J. Kane, "Diode laser measurements of concentration and temperature in microgravity combustion", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 10, 1999, 845-852
- [14] J. Wang, S. T. Sanders, J. B. Jeffries, and R. K. Hanson, "Oxygen measurements at high pressures using vertical cavity surface-emitting lasers", *App. Phys. B*. Vol. 72, 2001, 865-872
- [15] L. S. Rothman et al. "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 2009, 533-572