

## 마이크로 스케일의 흡수선과 흡수강도를 이용한 분무화염의 온도측정

### Temperature measurement of the spray flame using micro scale absorption bands and line strength

최 경 민\*

G. M. Choi

#### Abstract

It is necessary to develop a high frequency diode laser sensor system based on the absorption spectroscopy for the measurement of temperature of the spray flame. DFB diode laser operating near  $2.0\mu\text{m}$  was used to scan over selected  $\text{H}_2\text{O}$  transitions near  $1.9\mu\text{m}$  and  $2.2\mu\text{m}$ , respectively. The measurement sensitivity at wide range of sweep frequency was evaluated using multi-pass cell containing  $\text{CO}_2$  gas. This diode laser absorption sensor with high temporal resolution up to  $10\text{kHz}$  was applied to measure the gas temperature in the spray flame region of liquid-gas 2-phase counter flow flame. The successful demonstration of time series temperature measurement in the spray flame gives us motivation of trying to establish non-intrusive temperature measurement method in the practical spray flame.

**Key Words** : Voigt profile(포코트 분포), Diode laser sensor(다이오드 레이저 센서), Liquid-gas 2-phase flame(기액2상 화염)

#### 1. 서 론

고효율, 저공해 에너지 생산의 실현을 위해 고도의 연소제어기술이 요구되어지고있다. 이러한 요구에 부응하기 위해서는 연소기 내부의 연소 가스의 온도와 생성배기가스의 농도를 고속 및 고감도로 계측할 필요가 있다. 특히, 열전대와 가스분석기를 이용한 계측법은 화염의 형상을 변형시킬 뿐만 아니라 응답성에도 다소 문제가 있다. 따라서 비접촉 계측법의 개발이 요구되어져서 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 연소가스의 온도와 농도를 실시간으로 측정하기 위해서 근적외선의 상온반도체 레이저를 이용한 흡수법이 개발되고있다[1,2]. 이같은

반도체 레이저는 간편하고 저렴하며 사용이 간단하기 때문에 그 응용범위가 점차 넓어지고 있다. 측정대상 화학종으로는  $\text{H}_2\text{O}$ [3,4],  $\text{NO}$ [5],  $\text{NO}_2$ [6],  $\text{CH}_4$ [7,8],  $\text{CO}$ [9],  $\text{CO}_2$ [10] 등이 선택되어 왔다. 그러나, 종래의 반도체 레이저의 발진 주파수는  $0.6\text{-}1.8\mu\text{m}$  정도였기 때문에, 이 주파수대역의 화학종의 진동밴드의 흡수 강도는 상대적으로 약하다. 특히, 균일한 온도장 혹은 농도장이 시간적, 공간적으로 제한되어 있는 연소가스의 온도와 농도를 측정하기 위해서는 보다 장파장대역에서 고시간 분해능의 레이저 광원이 필요하다. 외부 캐비티형 반도체 레이저를 이용한  $2.0\mu\text{m}$ 부근의 진동밴드를 이용하여 연소가스의 농도를 측정한 보고[10]도 있으나, 그 시간분해능이 낮으므로 실제의 연소시스템에 응용 가능하다고는 보기 어렵다. 최근, 계측의 정확도와 시간분해능을 향상시키기 위해서 장파장의 DFB(Distributed Feed Back)반도체

\* 회원, 일본 항공우주연구소

레이저를 개발하여, 화염장의 연소가스온도와 농도를 계측한 결과가 보고되고 있다.[11] 그러나 대상의 화염이 층류화염이고, 실제의 연소기에서 생성되는 난류장에서의 응용에는 찾아보기 힘들다. 따라서 반도체 레이저 흡수센서를 이용한 실제 연소시스템에서의 계측기술은 아직 미흡한 단계에 있다. 연료를 연소시켜 에너지를 얻는 연소장에는 연소상태에 따라서 부유물질이 존재하는 경우가 많다. 특히, 액체연료를 이용한 연소장에는 반드시 액적이 존재한다. 그러나, 반도체 레이저를 이용한 흡수강도 계측법은 광로상의 정보를 반영하고 있고, 레이저 광의 굴절에 의한 계측불가능한 경우도 예상되는 것이 현실이다. 이러한 배경으로부터, 본 연구에서는 상온의 반도체 레이저를 이용한 연소장의 배기가스의 비접촉식 온도계측법의 확립과 분무화염 연소장의 비접촉식 온도계측의 가능성을 타진하고자 한다.

## 2. 계측의 기본이론

기체상태의 화학종이 진동수  $\nu$ 의 입사광을 흡수하면, 이때의 투과율  $T$ 는 Lambert-Beer의 법칙에 의해 다음과 같다.

$$T = \left( \frac{I}{I_0} \right) = \exp(-k_\nu L) \quad (1)$$

여기서,  $L$ 은 광로 길이,  $I_0$ ,  $I$ ,  $k_\nu$ 는 각각 진동수  $\nu$ 에 있어서 입사광 강도, 투과광 강도, 흡수 계수를 나타낸다.  $K$ 개의 화학종  $N_j$ 개의 흡수밴드가 중첩되어 있는 경우의 흡수 계수  $k_\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ )는 다음 식으로 표현된다.

$$k_\nu = P \sum_{j=1}^K X_j \sum_{i=1}^{N_j} S_{i,j}(T) \phi_{\nu,i,j} \quad (2)$$

여기서,  $P(\text{atm})$ 은 전압,  $X_j$ 는 화학종  $j$ 의 몰분율,  $S_{i,j}(T)(\text{cm}^2/\text{atm})$ 는 화학종  $j$ 의  $i$ 번째 흡수밴드의 흡수 강도,  $\phi_{\nu,i,j}$ 는  $j$ 번째의 흡수밴드의 상대선형함수이다. 선형함수  $\phi_{\nu,i,j}$ 는 흡수밴드의 중심파장에 대한 상대적인 흡수강도의 스펙트럼분포로 그 적분치는 아래 식과 같이 1이 된

다.

$$\int \phi_{\nu,i,j}(\nu) d\nu = 1 \quad (3)$$

계측된 흡수 스펙트럼은 여러 가지 요인에 의해 공명 진동수  $\nu_0$ 부근에서 확장(Broadening)한다. 이러한 확장을 결정하는 중요한 요인은 온도, 압력, 속도 등이다. 따라서 흡수 스펙트럼의 확장을 분석하기 위해서는 이러한 온도, 압력 및 속도의 정보가 필요하다. 이러한 흡수 스펙트럼의 확장은 로렌즈형과 가우스형의 조합으로 표현가능하고, 합성된 분포를 포오크트 분포(Voigt profile)라고 부른다. 따라서 이 포오크트 분포의 형상변화를 분석하면, 온도, 압력, 속도 등을 구할 수 있다.

특정의 화학종의 흡수선 강도는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$S_i(T) = N_L \left( \frac{2T_3}{T} \right) \left( \frac{\pi e^2}{m_e c^2} \right) \left( \frac{g_{l,i}}{Q(T)} \right) f_i \times \exp\left( \frac{-hc E_i}{kT} \right) \left( 1 - \exp\left( \frac{-hc \nu_{0,i}}{kT} \right) \right) \quad (4)$$

여기서,  $N_L$ 은 로슈미트수( $\text{cm}^{-3}$ ),  $e$ 와  $m_e$ 는 각각 전하량과 질량이다.  $c(\text{cm/s})$ 는 광속,  $Q(T)$ 는 회전-진동분배함수,  $h$ 는 프랑크 정수,  $g_i$ 는 천이전의 degeneracy,  $E_i$ 는 천이전의 에너지,  $f_i$ 는 천이전의 진동자 강도를 나타낸다.

온도  $T(\text{K})$ 에 있어서 흡수선 강도  $S_i(T)$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{T_0}{T} \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[ -\frac{hc E_i}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times \left[ \frac{1 - \exp(-hc \nu_{0,i}/kT)}{1 - \exp(-hc \nu_{0,i}/kT_0)} \right] \quad (5)$$

기체의 온도계측에는, 두 개의 흡수선의 강도비  $R$ 을 이용한다.  $R$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$R = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp\left[-\frac{hc}{k}(E_1 - E_2)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

(6)

식(6)은 온도만의 함수로서, 강도비R을 실험을 통해서 구함으로써 그 온도를 구할 수 있다. 즉, 다음의 식으로 표현된다.

$$T = \frac{hc}{k}(E_1 - E_2) \left[ \ln\left(\frac{1}{R} \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)}\right) + \frac{hc}{k}(E_1 - E_2) \frac{1}{T_0} \right]^{-1}$$

(7)

흡수화학종의 분압 혹은 물분율은 얻어진 온도값과 식(1)과 식(2)로부터 구할 수 있다.

본 연구에서는 필요한 화학종의 광흡수특성을 HITRAN과 HITEMP 데이터 베이스로부터 구하였다. 이러한 데이터 베이스는 100%완벽하다고는 할 수 없지만, 그 신뢰성은 어느 정도 인정받고 있고, 다른 선행 연구에서도 사용되고 있다. 따라서, 본 연구에서의 흡수선의 강도와 확장 등의 물성치는 HITRAN과 HITEMP 데이터 베이스로부터 구하였다. 표1에 본 연구에서 사용한 흡수선의 특성을 나타내었다.

Table 1. Characteristics of selected H<sub>2</sub>O transitions

Species	Transition Frequency (cm <sup>-1</sup> )	Line Strength (1200K) (cm <sup>2</sup> /atm)	Transition
H <sub>2</sub> O	4878.193	1.08E-3	(021)-(010)
	5008.101	4.91E-4	(011)-(000)

### 3. 분무연소장에서의 계측방법

액적이 부유하는 분무연소장에 흡수법을 적용하려면, 일차적으로 센서의 고시간 분해능이

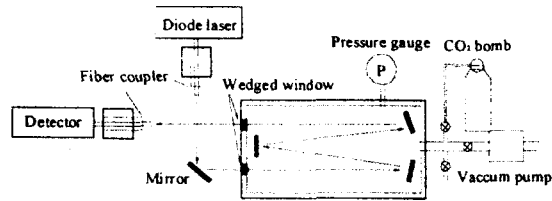


Fig. 1 Experimental setup for multi-pass cell measurement

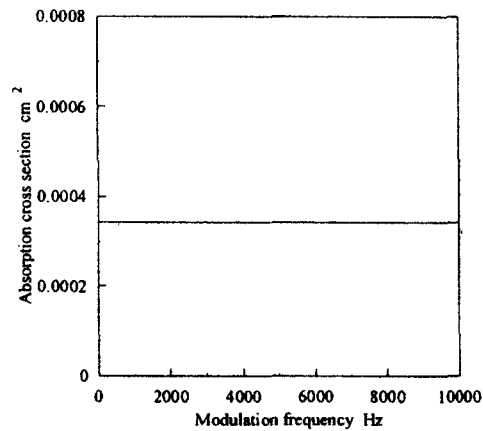


Fig. 2 Effect of modulation frequency on the absorption cross section

요구된다. 따라서, 반도체 레이저 흡수센서를 분무연소장에 적용하기 위해 앞서서 본 연구에서 개발한 반도체 레이저 흡수 센서의 시간분해능을 조사하였다. 그림 1은 실험에 사용된 멀티광로 셀과 흡수 강도 계측의 개략도를 나타낸다. 이 셀의 광로 길이는 250cm이고, 고밀폐성이므로 저농도의 계측에도 사용가능하다. 입력된 레이저광을 3개의 금코팅미러로 반사시켜서 광로를 연장시켰다. 셀의 밀폐성은 2 Torr/min의 조건에서 실험을 수행하였다. 창유리로는 에타론 효과를 방지하기위해 경사각도 1도의 웨지 유리를 사용하였고, 셀 내부의 진공을 위해서는 진공펌프를 사용하였다.

본 연구에서 개발한 반도체 레이저 흡수센서의 성능을 조사하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 반도체 레이저의 운전주파수를 500Hz로부터 10000Hz까지 변화시키면서 농도가 일정한 CO<sub>2</sub>가스의 흡수 강도를 계측한 결과, 거의 일정한 계측치가 얻어졌다. 일반적으로 난류화염의 특성주파수가 1000Hz를 초과하는 경우가 없는 것을 생각하면, 본 연구에서

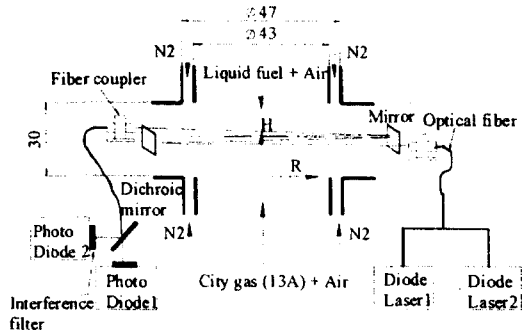


Fig. 3 Experimental schematic for the in-situ combustion measurements

개발한 반도체 레이저 센서 시스템은 실제 연소장의 계측에 충분한 시간분해능을 갖고 있다고 확인된다.

그림 3은 대항류 기액혼상 화염버너와 반도체레이저를 이용한  $H_2O$  흡수 강도 측정 장치의 개략도를 나타낸다. 하부노즐로부터 도시가스와 공기의 혼합기를, 상부노즐로부터 분무액체연료와 공기를 공급해서 기액상 화염이 형성된다. 액체연료는 상부노즐의 상류부에 위치한 액적실로부터 자유낙하시켜서, 비교적 큰 입경의 분무를 연소반응영역에 공급하였다. 넓은 범위의 입경분포를 가진 분무의 특성이 화염전반에 미치는 영향을 관찰하였다. 상하노즐은 이중구조로 되어있고, 그 내부관으로부터 위에서 언급한 예혼합 분무류와 예혼합 가스가 공급된다. 한편, 이중구조의 외부관으로부터 질소가스를 공급함으로써 주위공기와외의 전단류 형성을 방지함과 동시에 화염이 노즐립에 부착하지 않도록 하였다. 본 연구에서는 상하부 노즐간 간격을 30mm로 하였다. 화염의 신장에 대한 노즐로부터 공급되는 혼합기의 분출속도의 비를 신장율로 정의하였으며 본 실험에서는 40/s 이었다. 예혼합 가스의 연료로는 도시가스를 사용하였으며, 공급 당량비는 0.7이다. 그리고, 액체연료로서는  $C_{10}H_{22}$ 를 사용하였으며, 그 공급당량비는 0.56이고, 상하노즐에서의 분류속도는 0.6m/s이다. 하부노즐의 선단의 중심을 기준으로하여 반경 R, 축방향 H로 좌표설정하였다. 반도체 레이저 시스템은 1996nm와 2049nm의 두 개의 광원으로 구성되어 있다. 각각의 레이저광원으로부터 발진한 레이저광은 투과신호, 참조신호, 에타론신호로 3분할시켜



Fig. 4 Direct photography of liquid-gas 2-phase counter flow flame

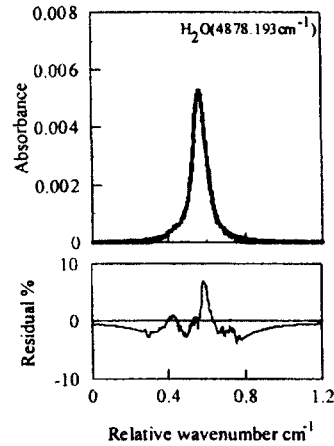


Fig. 5 Absorbance coefficients and residual distribution in the spray flame.

동시 측정하였다. 광로 길이는 투과광을 2개의 전반사 미러로 5회 반사시켜 연장시켰다. 집광된 투과광은 광파이버를 통해서 광다이오드에서 검출된다. 이때, 레이저광의 강도는 1.5kHz의 삼각파로 발진하였다.

#### 4. 계측 결과 및 고찰

그림 4에 대항류 기액 혼상 예혼합화염의 직접사진과 반도체 레이저 센서를 이용한  $H_2O$  흡수 강도 측정영역을 도시하였다. 가스 화염면은 하부노즐로부터 H=12mm의 위치에 정재하고, 분무화염은 H=18mm부근에 존재하므로, 반도체 레이저 흡수센서를 이용한 흡수강도계측은 H=17.5mm의 영역에서 이루어졌다. 본 연구에서는 분무화염의 보업을 위해서 가스의 예혼합화염을 먼저 형성시킨 후, 예혼합 분무류를 공급하였다. 예혼합 분무류에 의한 분무화염에

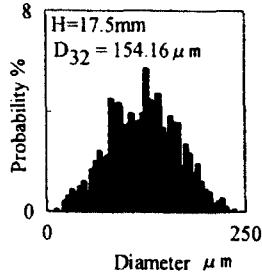


Fig. 6 Droplet diameter distribution

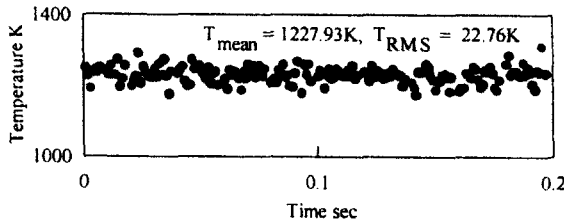


Fig. 7 Time series temperature signal measured by diode laser sensors in the spray flame region of liquid-gas 2-phase counter flame

의해 예혼합 가스화염면은 변형되었으나, 안정된 기액 혼상 화염이 형성된 것을 사진으로부터 확인할 수 있다. 이때, 상대적으로 입경이 큰 액적은 가스 화염면을 통과하기도 하였으나, 대부분의 액적은 가스화염면의 상부에서 확산화염의 형태로 연소되고 있다.

그림 5에 대향류 기액 혼상 연소장에 있어서 계측한 H<sub>2</sub>O의 흡수 계수 및 포오르트 분포와의 오차를 나타내었다. 흡수선의 중심파장은 4878.193cm<sup>-1</sup>이다. 흡수선의 흡수 강도 분포와 포오르트 분포와의 오차를 보면, 중심파장부근에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 비교적 큰 액적이나 분무화염대에서의 연소반응에 의한 밀도 구배가 그 원인이라고 생각된다. 따라서, 본 연구의 흡수선의 흡수강도계측에는 포오르트분포를 사용하기로 한다.

그림 6에 반도체 레이저 흡수센서를 이용한 흡수 강도 측정영역에서의 입경 분포를 나타내었다. 액적의 입경분포는 PDA계측을 통해서 이루어졌다. 입경 분포를 보면, 넓은 범위의 직경의 액적이 존재하고, 그 평균치는 약 154 μm 정도이다. 이같은 분무 액적이 연소장에서 부유함에도 불구하고, 반도체 레이저광은 큰 굴절없이 수평부에서 검출되었음을 그림 5로부터 알 수 있다. 본 연구의 실험에서는 반도체 레

이저의 광단면적을 약 1mm정도로 하였으므로, 직경 154 μm정도의 액적이 부유하는 연소장에서의 광로평균적인 흡수강도를 측정하는 것이 가능하였다.

그림 7에 분무화염영역에 있어서 반도체 레이저 흡수 센서를 이용하여 실시간 온도를 계측한 결과를 나타내었다. 평균온도와 그 RMS치는 각각 1227.93K와 22.76K이다. 평균온도는 단일화염온도에 비하여 매우 낮은 온도이다. 이 같은 결과는 계측영역에서 가스화염까지의 거리가 5.5mm나 떨어져 있고, 분무화염은 확산화염의 형태로 연소반응하고 있기 때문이라고 생각된다. 화염의 가시화된 직경은 60mm 정도이지만, 경계영역에서의 온도저하 등의 이유로 이 영역에서의 광로평균온도는 단일화염온도에 비해 매우 낮은 값으로 나타났다.

직접 사진에서 관찰되는 분무화염영역의 연소반응은 활발하게 보이므로, 국소 온도의 RMS치는 보다 큰 값이 예상되나, 전 광로에서의 평균값은 낮게 나타났다. 그러나, 광로상에 온도 구배가 존재하는 경우에도 반도체 레이저 흡수 센서를 이용한 실시간 온도계측이 가능함을 알 수 있다.

## 5. 결론

연소가스의 온도를 비접촉식으로 실시간 측정하기 위하여 시간분해능이 높은 반도체 레이저 흡수 센서를 개발하였다. 개발된 반도체 레이저 흡수 센서는 넓은 범위의 운전 주파수에서 그 성능이 확인되었고, 그 시간 분해능은 연소시스템에 적용 가능하였다. 그리고, 반도체 레이저 흡수 센서를 이용하여 기액 혼상 연소장에 형성된 분무화염대의 온도를 계측한 결과, 액적이 부유하는 연소장에서도 온도 계측이 가능하였다. 이러한 반도체 레이저 흡수 센서를 이용한 분무화염에서의 성공적인 온도 계측은 향후, 실제 연소시스템에서의 실시간 계측은 물론, 능동적인 제어에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Mihalcea, R.M., Baer, D.S., and Hanson, R.K., "Advanced diode laser absorption sensor for in-situ combustion measurements of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and gas temperature", AIAA98-0237, 1998
2. Sonnenfroh, D. M. and Allen, M. G., "Absorption measurements of the second overtone band of NO in ambient and combustion gases with a 1.8- $\mu\text{m}$  room temperature diode laser", Appl. Opt. 36:30:7970-7977, 1997.
3. Arroyo, M.P., and Hanson, R.K., "Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser", Applied Optics 32:30:6104-6116, 1993
4. Allen, M. G. and Kessler, W. J., "Simultaneous water vapor concentration and temperature measurements using 1.31 $\mu\text{m}$  diode lasers", AIAA J., 34:3:483-488, 1996.
5. Mihalcea, R. M., Baer, D. S. and Hanson, "A diode-laser absorption sensor system for combustion emission measurements", Meas. Sci. Technol., 9:327-338, 1998
6. Mihalcea, R. M., Baer, D. S. and Hanson, R. K., "Tunable diode laser absorption measurements of NO<sub>2</sub> near 670 and 395nm", Appl. Opt. 36:4059-4064, 1996.
7. Chou, S.I., Nagali, V., Baer, D. S. and Hanson, R. K. "Hydrocarbon measurements using diode laser absorption near 1.65 $\mu\text{m}$ ", AIAA paper, 96-0746, 1996.
8. Nagali, V., Chou, S. I., Baer, D. S. Hanson, R. K. and Segall, J., "Tunable diode-laser absorption measurements of methane at elevated temperatures", Appl. Opt., 35:21:4026-4032, 1996.
9. Daniel, R.G., Mcnesby, K.L., and Miziolek, A.W., "Application of tunable diode laser diagnostics for temperature and species concentration profiles of inhibited low-pressure flames", Appl. Opt. 35:4018-4025, 1996.
10. Mihalcea, R. M., Baer, D. S. and Hanson, R. K., "Advanced diode laser absorption sensor for in situ combustion measurements of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and gas temperature", Proc. Combust. Inst. 27:95-101, 1998.
11. Choi, G.M., Sibahara, M., Akamatsu, F., and Katsuki, M., "In-situ combustion measurements of CO<sub>2</sub> using diode laser sensors near 2.0 $\mu\text{m}$ ", 37th National Heat Transfer Symposium of Japan, 1:273-274, 2000 (in Japanese)
12. Rothman, L.S., Rinsland, C.P., Goldman, A., Massie, S.T., Edwards, D.P., Flaud, J.M., Perrin, A., Camy-Peyret, C., Dana, V., Mandin, J.Y., Schroeder, J., Mccann, A., Gamache, R.R., Wattson, R.B., Yoshino, K., Chance, K.V., Jucks, K.W., Brown, L.R., Nemtchinov, V., and Varanasi, P., J. "The HITRAN molecular spectroscopic database and hawks (HITRAN atmospheric workstation) 1996 edition", Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 60:665-710, 1998.