

반도체레이저를 이용한 온도 및 농도의 측정

정대헌* · 노동순* · 池田裕二**

Temperature and Concentration measurement using Semi-conductor diode laser

D. H. Chung, D. S. Noh and Yuji Ikeda

Key Words: Laser diode absorption, HITRAN data base, 2.0 μ m DFB

Abstract

A diode laser sensor system based on absorption spectroscopy techniques has been developed to measure CO₂ concentration and temperature non-intrusively in high temperature combustion environments using a 2.0 μ m DFB(Distributed Feedback) laser. Two optics was fabricated in pig-tail fashion and all optical components were implemented in a single box. The evolution of measurement sensitivity was done using test cell by changing sweep frequency and CO₂ concentration. Gas temperature was determined from the ratio of integrated line strengths. Species concentration was determined from the integrated line intensity and the measured temperature. The result show that the system has 2% error in wide operation frequency range and accuracy of CO₂ concentration was about 3%. The system was applied to measure temperature and concentration in the combustion region of a premixed CH₄ +air triangular flame. The measurement results of gas temperature agreed well with thermocouple results. Many considerations were taken into account to reduce optical noise, etalon effect, beam steering and base line matching problem. The evaluations results and actual combustion measurement demonstrate the practical and applicability for in-situ and real time combustion monitoring in a practical system.

1. 서론

광흡수법에 기초한 반도체 다이오드 측정시스템은 복잡한 연소시스템이나 다

상유동 내의 가스온도나 농도 등의 정확한 측정을 위한 목적으로 최근에 많은 관심이 집중되고 있다^{(1),(2)(3)}. 반도체레이저는 통신용으로 개발된 이래 상업적으로 1.3 - 1.8 μ m의 영역에서 주로 개발되었는데^{(2),(3),(4)} 이는 반도체 다이오드레이저가 튼튼하고, 가격이 저렴하며 광섬유로 부품이 구성되고 빠른 응답성의 특

* 한국에너지기술연구소

** 일본고베대학 기계공학과

정을 갖고있으며 이에 따라 사용하기 편리하고 실제시스템에 적용하기 용이하게 되어있기 때문이다. 실내온도에서 작동되는 반도체레이저는 높은 순간의 반복율이 가능하고 가스의 농도, 온도 및 속도의 측정까지 단 한번의 계측으로 가능하여 $CH_4^{(2)}$, $H_2O^{(1)}$, $CO_2^{(6,7,8,11)}$ 는 물론 최근에는 $NOx^{(4)}$ 까지 그 계측 영역이 확대되고 있다. 본 연구에서는 많은 가스밴드 중에서 CO_2 를 측정가스로 선정하였는데 이는 CO_2 의 계측을 통해서 연소효율이나 연소가스의 혼합율, 또 연소 성능의 파악이 용이하기 때문이다. 더욱이 CO_2 가스는 연소의 주부산물이고 후에 탄소세의 형식으로 나타날 그런하우스 효과 때문에 배출규제가 한창 논의 중인 중요한 가스이기 때문이다. 따라서 CO_2 가스에 대한 존재 증명은 연소 콘트롤이나⁽⁸⁾ 원격 계측 시스템에서 탄소방출을 모니터링 하는데 매우 유용하리라 사료된다.

한편 DFB (Distributed Feed Back)에 기초한 반도체레이저의 최근의 연구에서 사용가능한 파장의 범위가 2000 nm 영역까지 확대되었다^(11,13). 긴 파장에서는 더 강한 흡수계수를 갖게되고 높은 정확도와 짧은 흡수거리를 요구하게 된다. 실제의 2000nm 영역의 CO_2 최대 흡수선 강도는 1570nm 영역의 강도보다 약 70배 강하게 나타났다. 결과적으로 1570nm 영역에 비교해서 그 계측값의 민감도는 상당히 큰 결과로 나타난다. [그림 1] 은 2000nm 영역에서 CO_2 흡수선을 표시하고 있다.⁽¹³⁾ (HITRAN'98/HITEMP).

본 연구에서는 1996nm 와 2050nm 의 영역에서 DFB를 이용하여 계측시스템을 개발하고 시스템 평가를 테스트 셀에서 실행한 후 예혼합 증류 메탄/공기 화염

에서 적용결과를 나타내고 있다.

2. 이론적 배경 및 실험장치 구성

2.1 이론적 배경

측정된 흡수 스펙트럼으로부터 가스의 온도와 화학종 농도 계산이론은 앞의 많은 연구에서 논의되었으며^(1,2,3) Beer-Lambert 이론을 따른다. 스펙트럼 흡수 계수를 계산하기 위해서는

$$T = (I/I_0)_\nu = \exp(-K_\nu L) \quad (1)$$

여기서 I_0 는 입사광 강도, I 는 투과광 강도, ν 는 파수, L 은 광로상에 있는 흡수길이 이다. 이때 흡수계수 K 는 식 (2) 와 같이 표시된다.

$$K_\nu = S(T)P_{abs} \Phi_\nu \quad (2)$$

여기에서 $S(T)(cm^{-2}atm^{-1})$ 는 흡수선 천이강도, $P_{abs}(atm)$ 은 광을 흡수하는 기체의 분압, Φ_ν 는 주파수에 관련된 흡수형태의 함수이다. 전체의 흡수선에 대하여 식 (2)를 적분하면 흡수선강도 K 를 얻게되고 흡수길이에 흡수계수를 곱하게 되면 전체 흡수량, A 가 된다.

$$K = \oint_{-\infty}^{\infty} K_{\nu,i} L d\nu = S(T)P_{abs} \quad (3)$$

$$A_i = \oint_{-\infty}^{\infty} k_{\nu,i} L d\nu = S_i(T)LP_{abs,i} \quad (4)$$

따라서 주어진 화학종에 대한 부분압은 온도가 계산된 후에 흡수선 강도와 흡수선 길이를 이용하여 계산 가능하다.

부분압의 비 $P_{abs,i}/P_{abs,j}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{P_{abs,i}}{P_{abs,j}} = \frac{A_i}{A_j} \frac{S_j(T)}{S_i(T)} = 1 \quad (5)$$

여기서 첨자 i 와 j 는 흡수단계 1, 2사이에서 각각의 천이를 나타내고 흡수량

비율은 흡수선 형태에 무관한 온도의 함수가 된다. 온도에 의존하는 흡수선 강도는 다음과 같다.

$$S(T) = (8\pi^3 N_L / 3hc) \nu_o (273.15/T) R[g/Q(T)] [1 - \exp(-hc\nu_o/kT)] \exp[-hcE'/kT] \quad (6)$$

여기서 N_L 은 Loschmidt 수, g 는 축퇴 계수, c 는 광속, $Q(T)$ 는 분배함수, E' 는 저위상태의 에너지레벨, R 은 천이확률, k 는 볼츠만정수를 표시한다.

본 연구에서는 선정된 흡수선에 대하여 흡수선 강도를 구하였으며 이 값을 HITRAN'98 data base 와 비교 결과 약 5% 정도의 오차를 확인하였다. 온도는 2-color 방법에 의하여 2개의 흡수선 강도의 비 R 로써 계산 되었으며 화학종의 농도는 측정온도와 흡수선 강도를 이용하여 계산되었다.

$$R = \frac{A_i}{A_j} \quad (9)$$

$$= \frac{\sum_{j=0}^{\infty} S_j(T_o) \exp(-(h_o/k)E_j(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}))}{\sum_{j=0}^{\infty} S_j(T_o) \exp(-(h_o/k)E_j(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}))}$$

2.2 실험장치 구성

본 연구를 위한 측정시스템 계통도가 [그림 2]에 도시되어있다. HITRAN'98에 기초하여 최적의 흡수선이 선택된 후 예비 테스트를 거쳐 하나의 단위 박스에 내장된 반도체레이저(파장; 1996, 2050nm 부근) 시스템이 개발되었다. CO₂ 흡수선은 H₂O 흡수선 이나 다른 종류의 가스흡수선과 중복되지 않고 온도의 변화율에 대해서 큰 sensitivity가 선택 기준이었다. 선택된 2개의 레이저광

은(2mW) optical isolator 와 [그림 3]에서와 같이 2.0 μ m 부근의 파장영역에서 pigtail의 모양으로 조립되었다. output fiber 는 fiber separator에 연결되어 3개의 fiber로 나누어진다. (강도의 비는 8:1:1) 첫째 fiber는 직접 화염에서 흡수에 관여하고 둘째 fiber는 참조광으로 또 셋째 fiber는 ring interferometer에 관여하게된다. (FSR= 1.09 kHz) 실제의 측정을 위해서 2개의 측정 fiber 가 FC connector로 single fiber에 연결되었다. 직접 측정된 레이저광은 렌즈와 multi-mode 수광 fiber로 감지되고 optical filter는 2개의 파장을 분리한다. 6개의 fiber 가 photo detector, AD converter (4 MHz/ch \times 8 ch, 8bit) 와 PC 에 연결이 되어있다. 개발된 ring interferometer 는 1/2, 1/4 wave plates를 사용하여 2.0 μ m 영역에서 optical noise를 줄이고자 하였다. 레이저광에 의한 흡수면적은 흡수선과 기준선의 차이로부터 계산되었으며 2-line 온도 계측의 sensitivity는 2개의 흡수선 강도에 의하여 결정이 되었다. 2개의 레이저광을 통하여 측정된 흡수면적의 비는 (흡수선 강도의 비) 주파수 20 kHz 의 범위 내에서 온도계측을 위하여 이용되었다. [그림 4] 는 선택된 흡수선에 대하여 면적비를 사용하여 얻은 결과를 나타낸다. 더욱 높은 주파수에서 온도측정을 위해 흡수 스펙트럼의 높이에 의해 온도를 계산하는 peak ratio 방법도 이용되었는데 이에 따라 주파수 4MHz 의 범위에서도 온도 측정이 가능하였으며 삼각형, 사각형, 램프형의 레이저광 신호를 만들기 위해 function generator가 이용되었다.

3. 실험결과 및 해석

개발된 다이오드레이저 흡수시스템은 100Hz - 20kHz 의 범위에서 파장을 변화시키며 2-color 방법을 사용하여 온도를 계측하였다. [그림 5]는 주파수 100 Hz 에서 10kHz 까지 변화시키며 얻은 스펙트럼 강도로 이는 시스템의 안정성을 나타낸다. 주파수 변화에 따른 흡수 강도의 변화는 흡수거리 250cm 인 테스트 셀(Horriba, Japan) 을 이용하였다. 파장 2049.8 nm CO₂ 밴드를 사용하였으며 이때 안정성 오차는 약 2% 이었다. 또한 테스트 셀 내에서 농도를 임의로 변화시킨 결과를 다이오드레이저에 의한 농도 계측 결과와 비교하였다. 가스 농도는 1% 에서 50% 까지 변화하였는데 일반 화염의 연소시에 CO₂ 의 배출농도가 10% 부근인 것을 감안하여 실험은 이 부분에 집중되었다. 결과가 [그림 6] 에 도시되어 있다. 실험결과 오차는 3% 이내이었으며 테스트 셀의 양쪽의 유리창 에서 발생하는 에탈론 효과를 감소시키기 위하여 각도 3° 의 wedged window 가 사용되었다. 실제의 연소화염계측을 위하여 층류 예혼합 메탄/공기 삼각형태의 화염에서 1996nm, 2050nm 영역의 반도체레이저를 이용하여 온도와 농도를 계측하였고 R-type 열전대 온도측정 결과와 비교하였다. 이때 화염의 길이가 5cm 이었고 흡수 길이를 증가시키기 위해 거울을 이용하여 레이저 광이 통과하는 총 흡수 길이는 25cm가 되었다. 측정위치는 [그림 7] 과 같이 화염면에 수직방향으로 위치를 변화시켰고 당량비는 0.96과 1.0에서 계측하였다. [그림 8] 에 다이오드레이저를 이용하여 계측된 순간적인 가스의 온도가 열전대의 온도결과와 비교하여 도시되어 있다. Repetition rate 는 100Hz 부터 1kHz 까지 사용하였으며 이때 ramp 신

호를 이용하였다. 열전대는 복사효과에 대해서는 특별한 보정은 하지 않았고 열전대가 가까이 다가갈 때 화염면은 약간 이동되는 경향을 보였다. 전체적으로 당량비 1.1 과 0.96 에서 R-type 측정온도 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. [그림 9] 결과에 따르면 측정된 온도와 농도는 축을 따라서 점차 감소하는 경향을 보인다. 각각의 위치에서 농도의 변동분은 약 3%를 나타내었다. 오차의 원인은 측정시스템, 고온에서의 흡수선강도 오차, 시스템의 불안정성, collision effect 등으로 사료되었다.

연소계측의 결과는 난류화염과 실제의 연소를 나타내기 위한 시스템의 안정성을 결정하는데 평가되었다. 아직도 많은 문제가 남아있으며 특정온도에서 흡수선 강도 보정이 요구되었다. 측정 시 etalon 효과를 감소시키는 노력이 진행되어야 하며 baseline matching 문제와 화염 내에서 밀도차이에 의한 beam steering 문제 또한 연구되어야 한다.

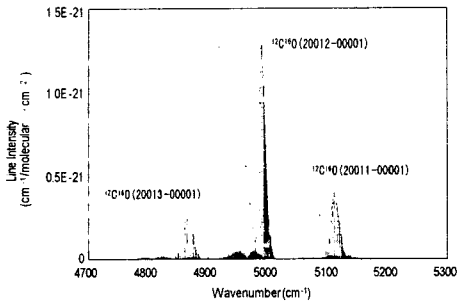
4. 결론

CO₂ 가스 밴드를 이용한 다이오드레이저 흡수시스템이 2.0 μm 범위의 DFB 레이저를 이용하여 개발되었다. 광학시스템의 안정성은 흡수길이 250cm 의 실험 cell 안의 가스농도와 온도를 변화시키며 평가되었으며 광학시스템은 대기조건 하에 이루어졌다. 이때 농도계측의 불확실성은 약 2%이었다. 연소계측은 층류화염 에서 이루어졌으며 계측된 가스온도와 CO₂ 농도는 열전대 계측을 통하여 비교되었다. 결과로 CO₂로 개발된 이 시스템은 실제의 연소계측을 위하여 충분히 잘 계측됨을 확인되었다. 향후

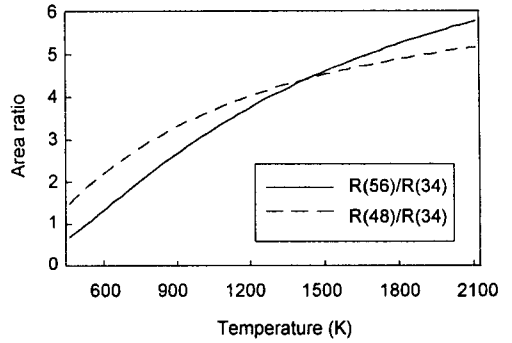
의 연구분야로는 NO(1807.3nm) 와 CO 를 밴드를 온도와 화학종의 계측이 요구되며 CT(Computed tomography)를 이용하여 2차원 화염의 온도와 농도 계측 또한 요구된다.

참고문헌

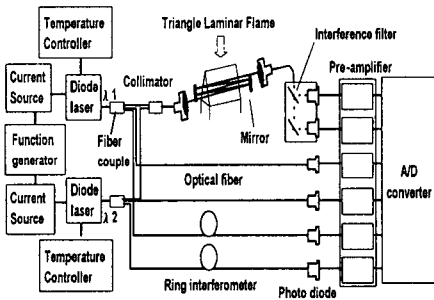
- (1) M.P. Arroyo and R.K.Hanson, "Tunable diode laser absorption technique for detection of water vapor in aerodynamic flows", AIAA paper, 92-0510, 1992.
- (2) Kiyoji Uehara and Hideo Tai, Remote detection of methane with a 1.66 μ m diode laser Applied Optics /Vol. 31, No.6/20 Feb.1992
- (3) T.Aizawa, T.kamimoto, T.Tamaru Measurement of OH radical concentration in combustion environments by wavelength-modulation spectroscopy with a 1.55 μ m distributed diode laser Applied Optics 38,1733-1741,1999
- (4) David M. Sonnenfroh and Mark G. Allen, "Absorption measurements of the second overtone band of NO in ambient and combustion gasses with a 1.8 μ m room-temperature diode laser", Applied Optics, Vol. 36, No. 30, pp. 7970-7977, 1997
- (5) E.R. Furlong, D.S. Baer, and R. K. Hanson, "Combustion control and monitoring using a multiplexed diode-laser sensor system", AIAA paper, 96-2763, 1996
- (6) David M. Sonnenfroh and Mark G. Allen, "Observation of CO and CO2 absorption near 1.57 mm with external-cavity diode laser", Applied Optics, Vol. 36, No. 15, pp. 3298-3300, 1997.
- (7) R.M. Mihalcea, D.S. Baer, and R.K. Hanson, "Diode laser sensor for measurements of CO, CO2, and CH4 in combustion flows", Applied Optics, Vol. 36, No. 33, pp. 8745-8752, 1997.
- (8) R.M. Mihalcea, D.S. Baer, and R.K. Hanson, "Advanced diode laser absorption sensor for in-situ combustion measurements of CO2, H2O, and gas temperature", AIAA paper, 98-0237, 1998
- (9) L.C. Philippe and R.K. Hanson, "Tunable diode laser absorption sensor for temperature and velocity measurements of O2 in air flows", AIAA paper, 91-0360, 1991
- (10) Louis C. Philippe and Ronald K. Hanson, "Laser diode wavelength -modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows", Applied Optics, Vol. 32, No. 30, pp. 6090-6103, 1993.
- (11) 池田裕二他 2 名 "半導體レーザー吸収分光法によるCO2溫度、濃度計測における誤差評價" 第36回日本傳熱シンポジウム講演論文集(1999-5) 255-256
- (12) 永井、安達、福井: 「III-V 族半導體混晶」 コロナ社 1988年
- (13) L. S. Rothman etc, The HITRAN Molecular Spectroscopic Database and Hawks 1996 and 1998 Edition.
- (14) 田浦 昌純、牟田研二 "半導體レーザー式insituガス分析装置の開発" 第37回燃焼シンポジウム 12月 1999



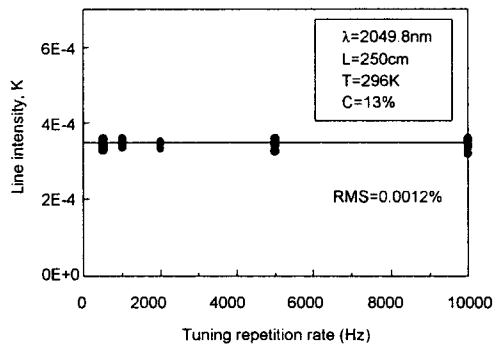
[그림 1] 2000 nm 영역의 Line strength



[그림 4] 온도계산 곡선



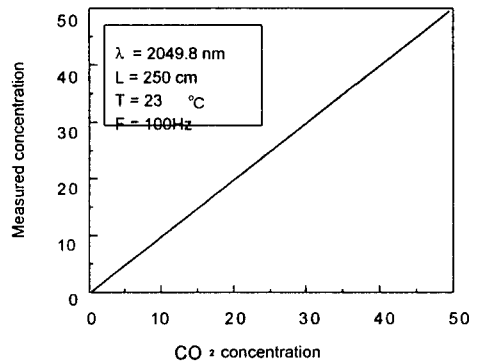
[그림 2] 실험장치구성도



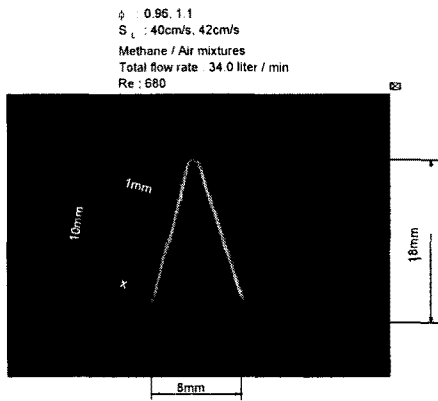
[그림 5] 주파수에 따른 안정성



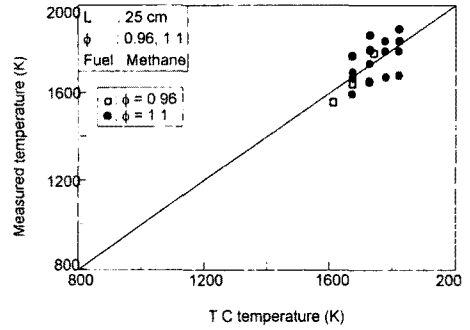
[그림 3] 반도체다이오드 레이저



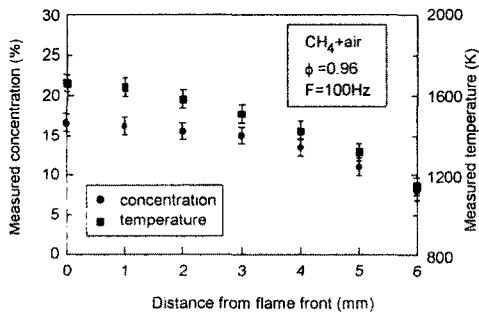
[그림 6] 가스농도 계측



[그림 7] 층류 삼각화염



[그림 8] 계측된 화염의 온도



[그림 9] 계측된 화염의 온도와 농도