

미량 기체의 밀도 측정을 위한 외부 공진기 반도체 레이저 광학공동 적분 투과 분광법

류훈철¹ · 유용심² · 이재용² · 한재원^{1*}

¹연세대학교 기계공학과, 서울 120-749

²한국표준과학연구원 나노광계측그룹, 대전 305-600

(2005년 12월 21일 받음)

광학공동 적분 투과 분광법(integrated cavity output spectroscopy, ICOS)은 파장가변 레이저와 광학공동을 이용해 미량기체의 절대 밀도를 고감도로 측정할 수 있는 실시간 흡수 분광계측 기법이다. 이 기법은 압전 소자를 이용해 길이가 변조되는 고 피네스(high finesse) 파브리-페로 공동(Fabry-Perot cavity)을 공명 투과하는 연속파 파장 변조 레이저의 적분 출력으로부터 공동 내부 시료의 분광 흡수량을 측정하는 원리를 이용한다. 본 연구에서는 764.7 nm 파장 근처에서 파장이 변조되는 외부 공진기 반도체 레이저를 광원으로 사용하고, 99.997%의 높은 반사율을 갖는 거울로 구성된 파브리-페로 공동을 이용해 파장에 따른 투과 감쇠 신호를 발생시키는 실험 장치를 구성하였다. 산소 기체에 대한 측정 실험을 수행한 결과, 최소 흡수계수 $8.45 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ 에 해당하는 미량기체 밀도를 측정할 수 있는 성능을 얻었다.

주제어 : 광학공동 적분 투과 분광법, 흡수 분광, 외부 공진기 반도체 레이저, 파브리-페로 공동, 산소

I. 서 론

미량 기체의 밀도에 대한 고감도의 정확한 계측은 환경 감시, 연소 효율 진단 및 연소기의 능동 제어와 감시, 반도체 공정에서의 오염진단 등의 여러 산업에서 그 중요성이 날로 고조되고 있다. 이러한 미량 기체의 밀도 측정을 위해 여러 가지 계측 기법이 개발되었는데, 이는 크게 접촉식 방법과 비접촉식 방법으로 구분할 수 있다. 접촉식 방법으로는 1900년대 초부터 알려진 혼합물 분리 기법인 가스 크로마토그래피(gas chromatography, 이하 GC)가 대표적인데 이는 1950년대의 비약적인 발전을 거쳐 현재는 계측감도가 수 ppt 수준에 이르는 가장 정밀한 계측기법으로 알려져 있다. 하지만 GC의 경우, 시료의 채집에서 분석에 이르는 시간이 다소 길어 실시간 계측기법으로는 적합하지 않고, 반도체 공정 등에서 사용될 경우, 접촉으로 인해 샘플링 과정에서 공정 상태에 영향을 미칠 수 있는 단점을 가지고 있다.

한편, 비접촉식 방법인 광학적 접근 방법은 1980

년대 후반에 개발되어 1990년대 후반부터 활발한 연구가 진행되어온 공동 광자 감쇠 분광법(cavity ringdown spectroscopy, 이하 CRDS)이 대표적이다. CRDS는 진공 상태인 공동을 투과하여 나오는 레이저 신호의 감쇠시간과 측정 대상 기체를 주입시킨 후 공동을 투과하여 나오는 레이저 신호의 감쇠시간의 비를 이용해서 특정 파장에서의 기체의 흡수도를 측정하는 기법으로, 측정 감도가 일반적으로 수십 ppb에서 수백 ppb 수준으로 알려져 있으며, 2000년 스펜스(Spence et al.) [1] 등이 1064nm 부근의 이산화탄소 계측에서 수 ppt 수준의 측정감도를 얻은 바 있다. 하지만 CRDS의 경우, 고가의 복잡한 실험 장치의 구성과 숙련된 계측 기법의 요구, 그리고 측정 환경에 민감한 계측 기법상의 특성으로 인해 실질적인 계측 장비로서의 응용에는 한계가 있다고 할 수 있다.

전술한 계측기법들의 단점을 보완할 수 있는 측정법으로 광학공동 적분 투과 분광법(integrated cavity output spectroscopy, 이하 ICOS)이 있다. ICOS의 기본적인 원리는 CRDS의 그것과 전반적으

* [전자우편] jaewhahn@yonsei.ac.kr

로 유사하지만 CRDS가 전적으로 공동에서의 투과 신호의 감쇠시간을 이용한 시간적인 해석 기법인 반면, ICOS는 공동으로부터 투과되는 신호의 직접적인 세기의 감소를 통해 대상 기체의 특정 파장에서의 흡수도를 획득하는 기법이다. 이 기법은 CRDS와 비견할 만한 측정 감도를 가지면서 상대적으로 간단한 실험 장치의 구성을 요구하므로 보다 실질적인 측정장비로서의 활용도가 우수하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 ICOS를 이용하여 반도체 제조 공정, 열처리 공정, 그리고 가스 분리 공정 등, 많은 분야에서 정밀 측정의 필요성이 요구되고 있는 미량의 산소 밀도를 측정하였다. 이를 위해서 주요 흡수 파장 대역이 760 nm ~ 770 nm인 산소를 공동 내부에 주입하고, 이 영역에 대해 파장 변조가 가능한 레이저를 조사하여 공동으로부터 투과되어 나오는 레이저 신호를 측정함으로써 진공 상태일 때의 투과 신호와의 세기의 감소 비교를 통해 산소의 흡수도를 측정 하였다.

II. 이 론

ICOS에서의 흡수 신호는 공동에서 투과되는 감쇠신호의 적분을 통해 얻어진다. 공동 내부의 분자나 원자에 의한 흡수는 진공 상태의 투과 신호를 기저 신호로 측정을 한 후, 측정 대상 기체를 주입한 상태에서의 투과 신호를 기저 신호로 정상화(normalization) 함으로써 얻어진다. 이를 통해 레일리(Rayleigh) 산란과 같은 영향으로 인한 분광선이 넓어지는 효과를 제거할 수 있게 된다.

파브리-페로(Fabry-Perot) 공동으로 입사된 빛이 공동 내부의 고반사 거울로 인해 다중반사를 거쳐 투과될 때, 투과 신호를 공동 내부에서의 반사 회수에 대해 적분한 식은 다음과 같이 정의된다.^[2,3]

$$I_{abs} = I_0 T^2 e^{-k(\nu)l} \{2 \ln(R \times e^{-k(\nu)l})\}^{-1} \quad (1)$$

여기서 I_{abs} 는 흡수 물질의 존재 시 공동 투과 신호, I_0 은 입사광의 세기, T 는 거울의 투과율 $T=(1-R)$, R 은 거울의 반사율, $k(\nu)$ 는 흡수 계수, 그리고 l 은 공동 길이를 나타낸다. 만약, 공동 내부에 흡수 물질이 없다면 식 (1)에서 흡수 계수, $k(\nu)=0$ 이 되므로 기저 투과 신호, I_g 는 다음과 같다.

$$I_g = I_0 T^2 \{2 \ln R\}^{-1} \quad (2)$$

그러므로 식 (1)과 식 (2)로부터 공동 내부의 흡수 물질로 인한 흡수도는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Absorption = \frac{I_{abs}}{I_g} = \frac{e^{-k(\nu)l} \ln R}{\ln R - k(\nu)l} \quad (3)$$

한편 공동 내부의 흡수로 인한 흡수 계수는 다음과 같이 표현된다.^[4]

$$k(\nu) = \left(\frac{I_g(\nu)}{I_{abs}(\nu)} - 1 \right) \frac{1-R}{l} \quad (4)$$

즉, 흡수 물질에 의한 투과신호의 감소는 흡수 계수와 공동 길이의 곱뿐만 아니라 광학공동을 구성하는 거울의 반사율에 절대적으로 의존한다. 그러므로 ICOS 기법을 사용하기 위해서는 광학공동의 반사율을 정확하게 측정할 필요가 있고 이를 위해서 CRDS 기법을 사용한다.

CRDS 기법을 이용하여 거울의 반사율을 구하기 위해서는 먼저 측정 파장에서의 공동 감쇠 시간, $\tau(\nu)$ 을 측정해야 하는데, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau(\nu) = \frac{l}{c\{(1-R) + k(\nu)l\}} \quad (5)$$

여기서 c 는 진공상태에서의 빛의 속도를 나타낸다. 식 (5)로부터 공동 내부에 흡수 물질이 없는 경우, 즉 $k(\nu)=0$ 인 경우의 공동 감쇠 시간, $\tau_0(\nu)$ 을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\tau_0(\nu) = \frac{l}{c(1-R)} \quad (6)$$

즉 광학공동이 진공인 상태에서 정확한 공동 감쇠 시간을 실험적으로 구한 후 이를 통해 거울의 반사율을 식 (6)을 통하여 알 수 있게 된다.

식 (4)에서 흡수 계수, $k(\nu)$ 와 공동 길이, l 의 곱은 거울이 없는 단일 경로에서의 물질에 의한 흡수를 나타내는데, 경로상에 한 쌍의 거울이 위치할 경우, 실제 레이저 빔이 공동 내부에서 다중반사를 하면서 거치게 되는 경로의 길이는 다음과 같다.

$$l_{eff} = \frac{l}{(1-R)} \quad (7)$$

표 1. 광학 공동 거울의 반사율과 유효 흡수 경로 길이와의 관계

반사율 (%)	경로 길이 (m)
99.9	300
99.95	600
99.99	3000
99.995	6000
99.999	30000

식 (7)을 이용하여 길이 30 cm인 공동을 통과하는 레이저 빔의 공동 내부의 거울의 반사율에 따른

경로 길이를 구하면 표 1과 같다. 즉, 효과적으로 공동 거울의 반사율을 증가시킬 경우, 레이저 빔이 공동 내부에서 거치는 경로는 거의 무한대로 볼 수 있다. 이를 통하여 공동 내부의 기체 분자에 의한 에너지의 흡수는 커지게 되고 결국 이것은 측정 감도의 향상에 가장 중요한 요소로 작용하게 된다. [5]

한편, 측정환경에서 발생하는 잡음의 영향으로 인해 실제 계측 가능한 감도는 공동 감쇠 시간의 비를 이용하여 계산된 계측 감도에 미치지 못하게 된다. 즉, ICOS 기법을 이용한 실제적인 계측 감도의 한계는 공동으로부터 투과되는 신호의 신호대 잡음비(signal to noise ratio)에 의존한다. 따라서 공동 내부의 기체 농도를 구하기 위해서는 진공상태에서 측정된 투과신호로부터 기저신호를 측정 한 후, 이 값과 측정 대상기체를 공동 내부로 주입한 다음 측정된 흡수선에서의 신호의 세기와의 비를

통하여 신호대 잡음비를 구하는 작업이 선행되어야 한다. 이 후, 흡수 분광 데이터베이스인 HITRAN 2002 분석 데이터와 실험적으로 얻어진 기체의 흡수 스펙트럼을 비교함으로써 이상기체 상태 방정식을 이용하여 공동 내부에서의 레이저 빔이 통과하는 일정 부피에서의 기체의 몰수를 알 수 있고, 이로부터 대상 기체 분자의 농도를 구할 수 있다.

III. 실험 방법

본 실험에서 구성된 ICOS 기법의 개요도는 그림 1과 같다. 공동의 여기용으로 쓰이는 광원은 757 nm ~ 773 nm의 파장 가변 범위를 가지고 약 0.35 nm 범위에서 연속 파장 변조가 가능한 리트만(Littman) 구조의 단일 모드 외부 공진기 반도체 레이저(external cavity diode laser, Sacher Laser Technik, TEC 500)가 사용되었다. 레이저 빔이 공동의 전단에 부착된 거울로 인해 반사되어 광원으로 되먹임 되는 것을 방지하기 위해 광학 단절기(optical isolator, Optics for Research, IO-5-TiS2-HP)가 사용되었고, 공동으로 입사되는 빔의 품질을 향상시키고 입사 빔이 공동 내부의 0차 공간 모드(TEM₀₀)와 잘 결합하도록 공간 필터(spatial filter)가 이용되었다. [6] 길이 30 cm의 파브리-페로 공동은 두 개의 고반사율을 가진 거울(R₁99.95%, at 765 nm)로 구성되어 있는데, 각각의 거울은 직경이 12.7 mm이고, 1 m의 곡률반경을

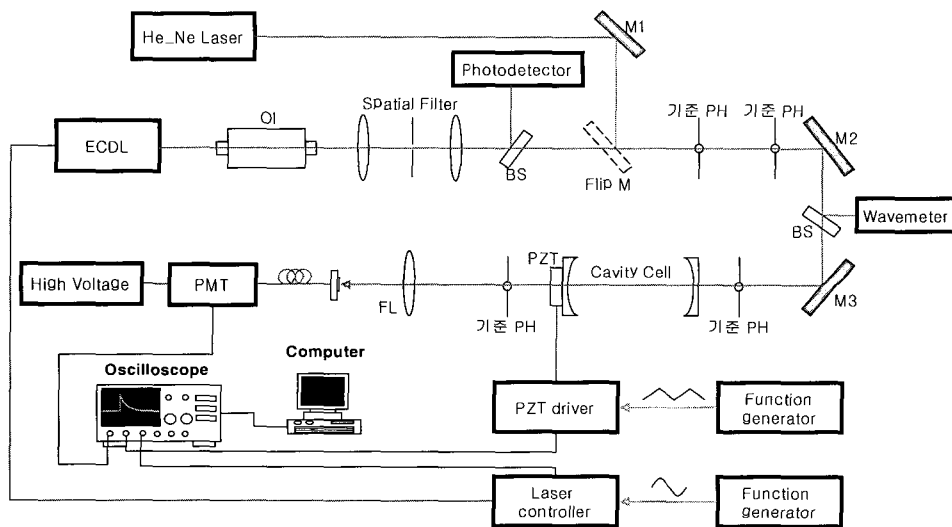


그림 1. ICOS 실험장치 개요도. (ECDL : 외부공진기 반도체 레이저, PMT: 광전자증배관, OI: 광학 단절기, M: 거울, PH: 편 홀, PZT: 압전소자, BS: 광 분할기, L: 렌즈)

가진다. 공동의 후단에 부착된 거울에는 튜브형의 압전 소자(piezoelectric transducer, PZT)가 부착되어 공동의 길이를 변화시키게 된다. [7,8]

공동으로 입사되는 빛의 정렬은 공동의 거울로부터 반사되는 빛을 기준으로 하는데, 이는 오실로스코프 상의 투과신호를 확인하면서 공동의 전단에 위치한 거울을 조절함으로써 이루어진다. [9] 공동 내부에서 다중반사를 거쳐 투과되는 신호는 다중모드 광섬유를 통해 고속 광전자 증배관(photomultiplier tube, Hamamatsu, R955, 600 Ω load resistance)로 전달되어 측정되며, 오실로스코프를 통해 기록된다. 공동은 진공펌프(rotary pump, Woosung Automa)와 연결되어 기저 진공도를 0.7 Pa 수준으로 유지하도록 하였고 공동 내의 압력은 압력계(pressure transducer, Vacuum General, CMLB-31)를 통하여 측정되었다.

본 실험에서 측정 대상으로 하는 산소의 흡수 파장 대역은 764.55 nm ~ 765.85 nm이며, 광원의 연속적인 파장 변조를 위해서 외부 공진기 반도체 레이저의 내부의 파장 조절 거울(tuning mirror)에 부착된 압전 소자를 100 Hz의 주기와 50 V의 진폭을 갖는 정현파(sine function)로 구동시켰다. 이와 동시에 파브리-페로 공동은 후단 거울에 부착된 압전 소자에 함수 발생기(function generator)와 고전압 증폭기(high voltage amplifier)를 통하여 87 Hz 주기와 100 V 진폭의 경사 전압(ramp voltage)을 인가하여 공동 길이를 변조하였다. 이러한 광원의 파장 변조와 압전소자를 이용한 공동 길이의 변조를 통하여 입사되는 빛은 공동 내부에 형성된 자유 스펙트럼 영역(free spectral range, FSR)의 간격으로 형성된 종모드(longitudinal mode)와의 주파수 불일치를 만들어낸다. 여기서 다수의 스위프(sweep)를 통해 각각의 주파수는 무작위적인 모드 일치율을 하게 되고, 이를 누적함으로써 공동의 종모드 사이에 위치할 수 있는 좁은 흡수 스펙트럼을 측정할 수 있다.

한편, 일반적인 반도체 레이저는 3% 내외의 출력 변동을 보이는데, 이는 공동 투과 신호에 필연적으로 영향을 미치게 된다. 이를 신호처리를 통해 보정해 주기 위해 광 분할기(beam splitter)를 사용하여 일부의 빔을 분할하여 광 검출기(photo-diode detector, New Focus, 2001)를 이용하여 출력 변동을 측정하였다. 또한 레이저 파장의 실시간 계측을 위하여 파장측정기(wavemeter, Coherent, Wave-

master)를 사용하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

ICOS 기법을 이용하여 대상 기체의 흡수도를 측정하기 위해서는 공동을 구성하는 거울의 반사율을 정확히 측정할 필요가 있다. 공동 내부에 흡수 물질이 존재하지 않을 때, 공동에서의 에너지 손실은 거울의 투과로 인한 것이라 가정할 수 있고, 이 공동에서의 감쇠시간을 측정함으로써 거울의 반사율을 구할 수 있다.

764.74 nm 부근에서 공동의 내부를 진공화시키고 8번의 누적을 통해 측정된 투과신호는 그림 2와 같다. 신호가 감쇠되는 양상은 지수 함수의 형태로 나타나고, 그 감쇠시간은 35.97 μs이다. 한편, 동일 파장에서 5.33 kPa의 산소를 공동 내부로 주입시킨 후 8번의 누적을 통해 측정된 투과신호는 그림 3과 같다. 이 또한 지수 함수의 형태를 가진 감쇠 양상

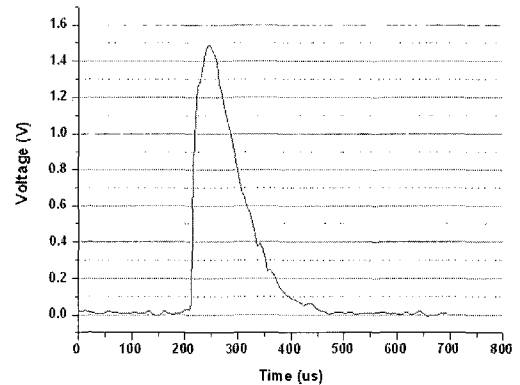


그림 2. 진공 상태의 광학공동을 투과한 파장 764.74 nm 레이저의 공동 감쇠 신호.

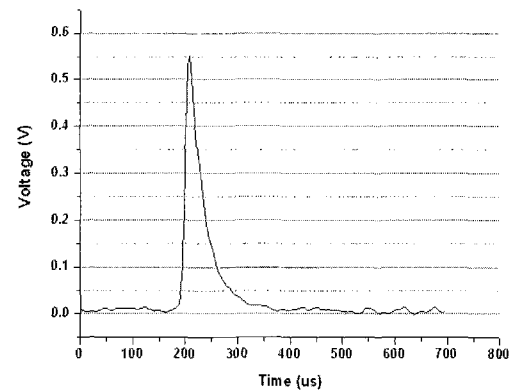


그림 3. 5.33 kPa 압력의 산소가 주입된 광학공동을 투과한 파장 764.74 nm 레이저의 공동 감쇠 신호.

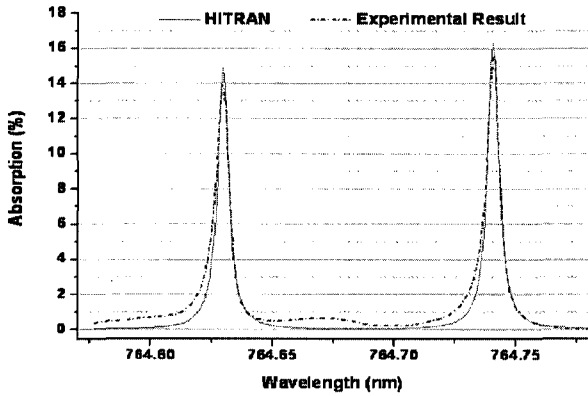


그림 4. 파장 765 nm 근처에서 측정된 ICOS 산소 흡수 스펙트럼 측정결과. (실선: HITRAN 계산값, 점선: 실험값)

을 가지고, 그 감쇠시간은 32.96 μ s이다. 진공 상태에서의 감쇠시간을 통해서 획득한 측정된 거울의 반사율은 식 (6)에 의해 99.997%가 된다. 또한 식 (7)을 이용해 레이저 빔이 공동내부에서 다중반사를 하면서 이동하는 길이를 구하면 약 10.7 km가 된다.

레이저의 파장을 764.55 nm ~ 764.85 nm의 약 0.3 nm 범위에서 100 Hz로 변조시키면서 256번의 신호 누적 통해 획득한 산소 5.33 kPa의 흡수선은 그림 4와 같다. 그래프의 실선은 물질의 흡수 분광 데이터베이스인 HITRAN 2002를 통해 계산된 흡수 분광선이고 점선은 본 실험을 통해 얻어진 결과이다. 764.74 nm 부근에서 산소에 의한 흡수도는 약 16%로 계산된 예상 값과 실험치가 잘 들어맞음을 알 수 있다. 한편, 764.74 nm 부근에서 HITRAN으로 계산된 흡수선의 반치폭(full width half maximum, FWHM)은 0.00537 nm이고, 실험을 통해 얻어진 반치폭은 0.00613 nm로 약 12%의 오차를 가진다.

흡수 물질이 없는 상태, 즉 진공 상태에서의 기저 투과신호의 세기와 산소 5.33 kPa를 주입한 후 측정된 투과신호의 세기, 그리고 거울의 반사율을 이용하여 식 (4)를 통하여 흡수 계수를 구하면 약 $8.45 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ 이 된다. 이는 실제 계측에서 발생하는 잡음의 영향을 고려하지 않은 상황에서 공동 거울의 반사율을 이용하여 계산된 값으로 이상적인 측정한계를 나타낸다. 실제 측정 감도는 흡수 스펙트럼 데이터로부터 신호대 잡음비를 구하여 이것으로 측정 압력을 나누어 줌으로써 구해질 수 있다. 본 실험에서 측정된 신호대 잡음비는 다음과 같이 정의된다.

$$S/N = \frac{\alpha_p}{2\sigma} \quad (8)$$

여기서 α_p 는 흡수선의 투과 신호를 나타내고, σ 는 기저 투과 신호의 표준편차를 나타낸다. 오실로스코프로 측정된 흡수 스펙트럼을 통해 기저 신호의 표준편차를 구하면 0.0366 mV가 되고, 이 값을 이용해서 식 (8)을 통해 신호대 잡음비를 구하면 222가 된다. 이 신호대 잡음비를 이용해서 측정 가능한 산소의 부분압을 구하면 23.99 Pa이 되며 이는 약 237 ppm의 측정 감도를 나타낸다. 본 실험에서는 산소의 오버톤(overtone)을 계측한 것이며 산소 자체도 다른 분자에 비해 상대적으로 낮은 흡수 계수를 가지므로 만약 산소 대비 1000배 정도의 흡수 계수를 가지고 있는 1390 nm 대역의 수분이나 1960 nm 대역의 암모니아에 대해서 본 장비로 계측할 경우, 측정감도는 수백 ppb에 이를 것으로 예상된다.

한편, 압력의 변화에 따른 산소의 흡수 스펙트럼의 세기와 폭은 그림 5와 같다. 이것은 흡수파장 767.87 nm에서 측정된 값으로 실선은 대기압(산소 분압 21.33 kPa)에서의 흡수 스펙트럼, 쇠선은 5.33 kPa에서의 흡수 스펙트럼, 점선은 2.66 kPa에서의 흡수 스펙트럼을 나타낸다. 압력이 감소함에 따라서 흡수 스펙트럼의 세기도 감소함을 볼 수 있고, 21.33 kPa, 5.33 kPa, 2.66 kPa 각각의 반치폭은 0.01012 nm, 0.0086 nm, 0.0084 nm로 압력이 큰 상황에서 흡수 스펙트럼의 선폭은 넓어짐을 알 수 있다.

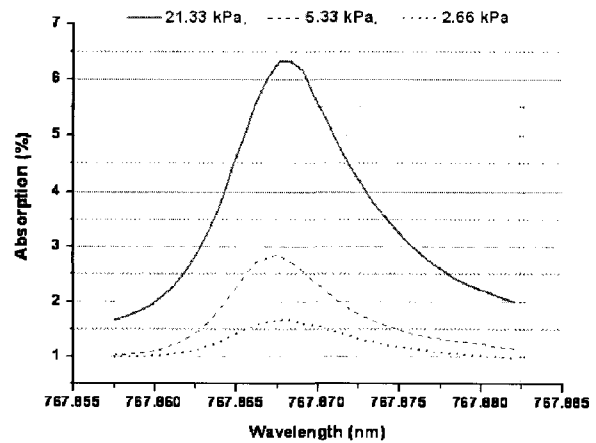


그림 5. 산소 기체 분압에 따른 ICOS 흡수 스펙트럼의 변화. (실선: 21.33 kPa, 굵은 점선: 5.33 kPa, 가는 점선: 2.66 kPa)

V. 결 론

본 연구에서는 ICOS 기법을 이용하여 산소의 흡수 스펙트럼이 5.33 kPa의 압력, 296 K의 온도에서 764.55 nm ~ 764.85 nm의 0.3 nm 범위의 두 개의 흡수선에 대해 계측되었다. HITRAN 2002를 통해 얻은 산소의 흡수 분광 데이터는 Voigt profile을 적용시켜 실험적으로 구해진 흡수 스펙트럼과 비교되었고, 두 스펙트럼은 잘 일치하는 모습을 보여 주었다. 본 장치로 측정한 산소의 흡수선에서 764.74 nm에 대한 측정 가능한 최소 흡수 계수는 $8.45 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ 이고 신호대 잡음비는 222로, 실제 측정 가능한 산소의 부분압은 23.99 Pa가 된다. 또한 공동 내부의 산소 압력에 따른 흡수 스펙트럼이 21.33 kPa, 5.33 kPa, 2.66 kPa에 대하여 측정되었다. 압력이 높을수록 큰 흡수 세기를 보였고, 선 폭은 증가하는 양상을 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원의 진공기술기반구축사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] T. G. Spence, C. C. Harb, B. A. Paldus, and R. N. Zare, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 347 (2000).
- [2] A. O'Keefe, J. J. Scherer, and J. B. Paul, *Chem. Phys. Lett.* **307**, 343 (1999).
- [3] A. O'Keefe, *Chem. Phys. Lett.* **293**, 331 (1998).
- [4] G. Berden, R. Peeters, and G. Meijer, *Int. Rev. Phys. Chem.* **19**, 565 (2000).
- [5] D. S. Baer, J. B. Paul, M. Gupta, and A. O'Keefe, *Appl. Phys. B* **75**, 261 (2002).
- [6] R. D. Van Zee, J. T. Hodges, and J. P. Looney, *Appl. Opt.* **38**, 3951 (1999).
- [7] J. W. Kim, J. W. Hahn, Y. S. Yoo, J. Y. Lee, H. J. Kong, and H. W. Lee, *Appl. Opt.* **38**, 1742 (1999).
- [8] D. H. Lee, Y. Yoon, B. Kim, J. Y. Lee, Y. S. Yoo, and J. W. Hahn, *Appl. Phys. B* **74**, 435 (2002).
- [9] R. Engeln, G. Berden, E. Berg, and G. Meijer, *J. Chem. Phys.* **107**, 4458 (1997).

Integrated Cavity Output Spectroscopy Using an External Cavity Diode Laser for the Density Absorption Measurement of Trace Gases

Hoon Chul Ryoo¹, Yong Shim Yoo², Jae Yong Lee², and Jae Won Hahn^{1*}

¹*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749*

²*Optical Nano Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600*

(Received December 21, 2005)

Integrated cavity output spectroscopy(ICOS) is a simple, non-intrusive absorption measurement technique that can detect and quantify trace-level gas species. The spectral absorbance of a gas is quantified from the integrated optical output of the modulated high-finesse cavity containing the sample which is irradiated by a wavelength-swept laser source. We constructed an experimental setup by using a tunable single mode external cavity diode laser operating at the wavelength near 765 nm and a Fabry-Perot cavity with length modulation achieved by a piezoelectric transducer where one of the cavity mirrors sat on. In the experiment performed on minute oxygen gas at the wavelength near 764,5 nm, we demonstrated the minimum detectable absorption of $8.45 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$.

Keywords : Integrated cavity output spectroscopy, Absorption spectroscopy, External cavity diode laser, Fabry-perot cavity, Oxygen

* [E-mail] jaewhahn@yonsei.ac.kr