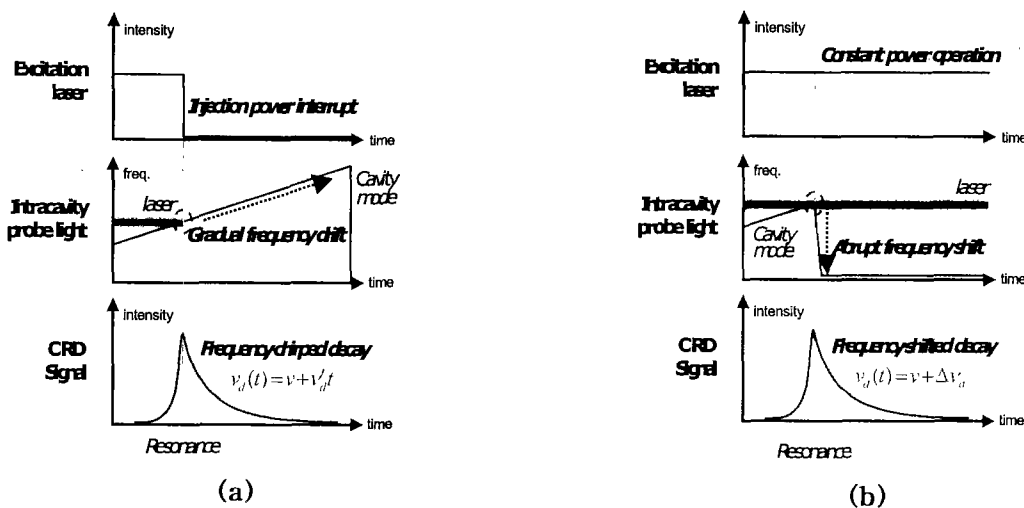


# 연속파 레이저를 이용한 주사공동 광자감쇠 분광기에서 공동 도플러 편이가 흡수 분광선 측정에 미치는 영향

## Influence of the intracavity Doppler shift of a probe light in the swept-cavity ringdown spectrometer using cw lasers

이재용, 김재완, 한재원  
한국표준과학연구원 광기술표준부  
jaeyong@kriss.re.kr

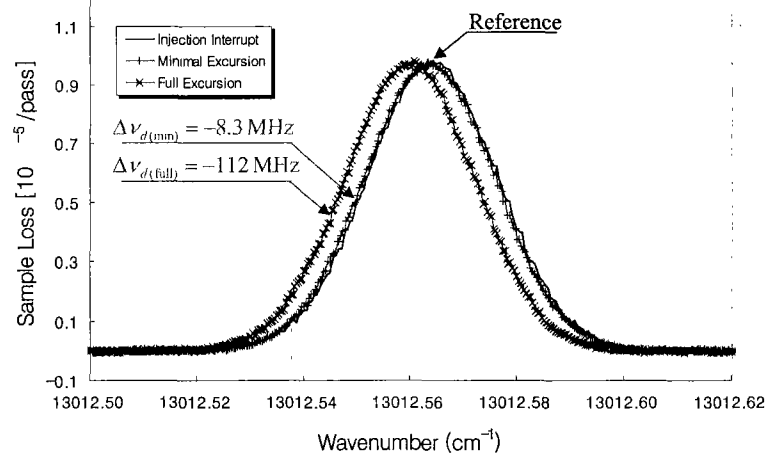
공동광자감쇠 분광법(Cavity ringdown spectroscopy: CRDS)은 높은 반사율을 갖는 거울로 구성된 광학 공동 안으로 레이저 광을 입사시키고 나서 출력 거울을 통해 빠져 나오는 빛 세기의 감쇠시간을 측정함으로써, 시료를 포함하는 공동 내부의 손실을 높은 감도로 측정하는 분광 기술이다. 펄스 레이저를 이용하여 구현할 수 있는 초기 형태의 CRDS는 간단한 장치 구성 및 동작, 그리고 분광 파장대의 다양성을 바탕으로 아직 널리 사용되고 있지만, 최근에 와서는 높은 주파수 분해능과 빠른 데이터 수집률, 그리고 안정된 소형 광원의 장점 등을 추가할 수 있는 연속파 레이저(CW laser) 광원을 이용한 CRDS 기술(CW-CRDS)의 개발과 적용이 급속히 늘어가는 추세에 있다. 펄스형 CRDS와 달리, 제안된 여러 형태의 CW-CRDS 방법들은 공통적으로 레이저 광의 에너지를 높은 피네스의 공동 내부로 공진 결합(resonant coupling) 시키는 과정에 이어 감쇠형태의 출력광을 생성하기 위한 여기 차단(excitation decoupling) 과정을 수행하게 된다. 효율적인 레이저-공동 결합을 위해서는 연속파 레이저 광과 좁은 선평의 공동 모드 사이에 공진을 이루어야 하는데, 기술적 요구도가 비교적 높지 않으면서도 안정적인 동작이 용이한 공동 길이 주사(cavity length scan) 방식<sup>(1,2)</sup>이 공동 잠금(cavity frequency locking) 방식<sup>(3)</sup>에 비해 보편화되어 있다. 본 연구에서는 공동 길이 변조를 위해 움직이는 공동 거울로부터 반사되는 조사광(probe beam)의 연속적인 도플러 주파수 편이<sup>(4)</sup> (Doppler frequency shift)가 시료의 흡수 스펙트럼 측정에 미치는 영향을 조사하였다.



**Fig. 1.** Aspects of Doppler frequency shift of a probe beam inside a ringdown cavity. Fundamental differences arise between the two typical CW-CRDS schemes based on (a) injecting light interrupt and (b) antiresonance cavity excursion, with respect to the amount and the time span of the influence from Doppler shifts.

그림 1에서 보는 바와 같이, 공동주사 방식의 CW-CRDS는 크게 (a) 연속적인 공동 주파수 주사 과정에서 공진이 이루어지는 순간 연속파 레이저의 공동 입사를 물리적으로 막는 주입 차단(injection interrupt) 방식<sup>(1)</sup>과 이에 반하여 (b) 공진 순간에 공동 길이를 비공진 상태로 급격히 변화시키는 비공진 이송(antiresonance cavity excursion) 방식<sup>(2)</sup>으로 다시 양분할 수 있다. 주입 차단 방식의 경우, 감쇠 신호가 얻어지는 동안 지속되는 공동 주사로 인해 조사광의 선형적 주파수 표류(chirp)가 존재하기 때문에, CRD 신호는 주파수 표류 흡수량을 반영한 비지수 감소(non-exponential decay) 함수가 얻어진다.<sup>(5)</sup> 결과적으로 측정되는 흡수 분광선은 거울의 주사속도와 CRD 신호의 감쇠 시간에 비례하는 유효 도플러 천이량 만큼 이동함과 동시에 선폭 확대(lineewidth broadening)가 발생하게 되는데, 이를 가중치 선형 곡선 맞춤(weighted curve fit)에 의한 CRD 신호 해석을 통해 정량적으로 분석하였다. 반면 비공진 이송 방식에서는, 공진 직후 공동 모드 및 조사광의 주파수 변화가 짧은 시간 내에 완료된 다음에 CRD 신호가 발생하므로, 선모양(lineshape)의 변화없이 단순히 주파수 이동된 분광선 모양이 얻어지게 된다. 이때, 분광선 이동량은 비공진 이송 후의 최종 공동 모드 주파수와 입사 조사광의 주파수 차이만으로 간단히 결정된다.

그림 2는 실험적으로 측정된 768.48 nm 근처의 산소분자 흡수 분광선으로서, 100-Hz 반복률로 1 FSR (free spectral range: FSR) 공동 주사시킨 상황에서 얻어진 주입 차단 방식의 흡수선(계산에 의한 예상 이동치: 3.5 MHz)과 공동 이송량이 각각 최대폭인 0.5 FSR(예상 이동치: 18.7 MHz)과 잡음 한계 최소폭인 0.03 FSR(예상 이동치: 250 MHz)을 갖는 비공진 이송 방식의 흡수선 모양이다.



**Fig. 2.** Absorption spectra of molecular oxygen near  $13012.56 \text{ cm}^{-1}$  (768.48 nm). Spectral profiles were obtained in the injection laser interrupt scheme(solid) and in the antiresonance cavity resonance scheme with a full excursion(x on line) and with a minimal excursion(+ on line).

**참고문헌**

1. D. Romanini, A. A. Kachanov, N. Sadeghi, and F. Stoeckel, Chem. Phys. Lett. **264**, 316 (1997).
2. J. W. Hahn, Y. S. Yoo, J. Y. Lee, J. W. Kim, and H.-W. Lee, Appl. Opt. **38**, 1859 (1999).
3. B. A. Paldus, C. C. Harb, T. G. Spence, B. Wilke, J. Xie, J. S. Harris, and R. N. Zare, J. Appl. Phys. **83**, 3991 (1998).
4. M. J. Lawrence, B. Wilke, M. E. Husman, E. K. Gustafson, and R. L. Byer, J. Opt. Soc. Am. B. **16**, 523 (1999).
5. K. J. Schulz and W. R. Simpson, Chem. Phys. Lett. **297**, 523 (1998).

