

에탈론과 공진기 결합을 이용한 고분해능 공동광자감쇠 분광법

High-resolution cavity ringdown spectroscopy realized with the combination of an etalon and the cavity

유용심, 김재완, 이재용*, 한재원
 한국표준과학연구원 양자연구부, *한국과학기술원 물리학과
 ysyoo@kriss.re.kr

공동광자감쇠 분광학(Cavity Ringdown Spectroscopy, CRDS)은 고감도의 흡수분광법으로 미량기체의 농도나 흡수분광선의 연구에 사용되어 왔으며 화염이나 플라즈마에도 응용되고 있다. 이 분광법은 시간에 따라 지수함수로 감쇠하는 공동광자감쇠신호의 감쇠상수를 측정하는 기술인데, 레이저의 밴드폭이 흡수선폭보다 넓으면 감쇠신호가 지수함수에서 벗어나 오차를 발생하게 된다. 그러므로 오차를 줄이려면 좁은선폭의 레이저를 사용하거나 공동광자감쇠신호의 주파수를 분리하여야 한다. 분광선폭보다 매우 넓은 선폭의 레이저를 사용하고 분광기를 이용하여 공동광자감쇠신호를 분리하는 방법들이 제안되었다. J. Scherer⁽¹⁾는 회절격자로 주파수를 분리하고 회전거울과 CCD를 사용하여 넓은 영역의 스펙트럼을 동시에 측정할 수 방법을 제안하였다. 이 방법은 회절격자의 분해능보다 넓은 흡수선폭의 스펙트럼을 측정하는데 사용될 수 있다. R. Engeln 와 Meijer⁽²⁾가 제안한 방법은 푸리에 변환 분광기(Fourier transform spectrometer)를 사용하여 공동광자감쇠신호를 분리하는 것으로 분해능은 회절격자보다 높으나, 분광기의 길이를 변화시켜서 스펙트럼을 측정하기 때문에 J. Scherer의 방법처럼 실시간으로 스펙트럼을 얻을 수는 없다. 본 연구에서는 수 GHz의 선폭을 가진 펄스레이저로 이 보다 좁은 도플러 선폭을 가진 분광선의 스펙트럼을 얻는 방법으로 에탈론의 사용을 제안하였다.

제안된 방법을 실현하기 위해 선폭이 2.5 GHz 인 OPO(Continuum, Sunlite) 레이저를 사용하여 아세틸렌의 [50]₁₀⁰0 밴드의 P(9) 분광선을 측정하였다. 공동의 길이는 100 cm 였으며, 사용된 거울의 지름은 1.27-cm, 곡률반경은 4-m, 반사율은 570-610 nm 영역에서 99.99% 이상이었다. 에탈론(CVI ET-150, 두께 1.5 cm)의 FSR(free spectral range)은 6.6 GHz 이고, 반사율은 570 nm에서 99% 이었다. 에탈론의 열팽창에 의한 오차를 줄이기 위해 5mK 내에서 온도를 안정화를 하였으며, 에탈론의 분해능은 30 MHz 이었다. 에탈론에 의해 분리된 신호는 직경 200 μm 의 광섬유를 통해 측정하였다.

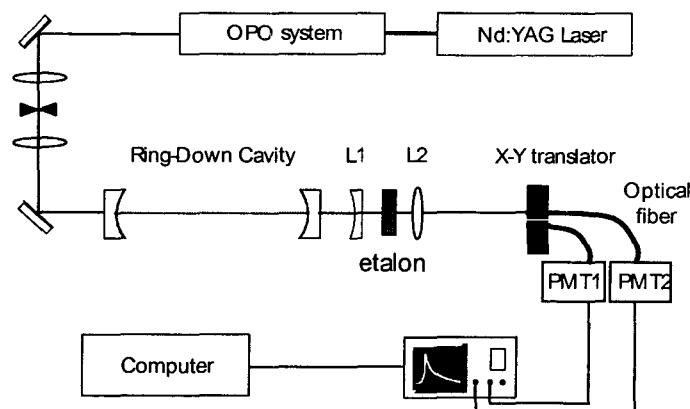


그림 1. 에탈론을 사용한 공동광자감쇠 분광기의 개략도.

그림 2는 아세틸렌 P(9) 분광선의 스펙트럼으로 에탈론을 사용하여 측정할 때는 OPO 레이저의 파장을 흡수선의 중심주파수에 고정하고 광섬유를 움직이면서 측정하였다. 연속발진레이저(Coherent 899)와 OPO 레이저의 스펙트럼은 레이저의 파장을 바꾸어 가면서 측정하였다. 연속발진레이저를 사용한 측정은 공동의 길이를 빠르게 변조하여 감쇠신호를 측정하는 방법을 사용하였다.⁽³⁾ 연속발진레이저로 측정된 분광선의 선폭은 1.295 GHz 로 도플러 선폭과 1.5% 내에서 일치하였으며, 측정된 line strength 는 $2.76 \times 10^{25} \pm 9.3 \times 10^{28}$ 이다. OPO 로 측정된 분광선의 선폭은 3.3 GHz 이고, 분광선의 중심에서의 흡수계수가 연속발진레이저로 측정된 결과의 15% 로 작아졌으며 결과적으로 천이선의 세기는 40% 작게 측정되었다. 에탈론을 사용하여 측정된 분광선의 선폭은 연속발진레이저로 측정된 결과에 대해 6% 증가하였고 중심주파수에서의 흡수계수는 연속발진레이저로 측정된 결과에 대해 8% 감소하였으나 천이선의 세기는 2%내에서 일치하였다. 에탈론을 사용하여 측정된 스펙트럼이 연속발진레이저로 측정된 것과 일치하지 않는 것은 사용한 광섬유의 직경이 커서 공동의 모드 4개를 한꺼번에 측정할 정도로 분광기의 분해능이 낮아졌기 때문이다. 그림 3은 에탈론을 사용하여 측정된 아세틸렌의 농도이다. 농도의 측정은 분광선의 중심주파수와 흡수가 없는 부분의 주파수, 두 주파수에서만 측정된 감쇠시간으로 부터 구하였다. 즉, 측정된 압력영역에서는 압력에 의한 선폭확대를 무시할 수 있으므로 천이선 세기는 중심주파수에서의 흡수계수와 선형적인 관계가 성립한다. 그러므로 농도는 중심주파수와 흡수가 없는 부분의 주파수에서 측정된 감쇠시간으로 부터 천이선 세기를 구한 후 연속발진레이저로 측정된 line strength 로 나누어서 구하였다. 에탈론으로 측정된 농도는 측정된 압력으로부터 구한 농도(실선)와 3% 이내에서 일치하였다.

본 연구에서 측정된 결과로 볼 때 에탈론을 사용하여 공동광자감쇠신호의 주파수를 분리하여 스펙트럼을 측정하는 것이 넓은 선폭의 레이저로 측정하는 것보다 오차가 작으며, 에탈론이 주파수를 공간적으로 분리하므로 분광선 스펙트럼의 실시간 측정이 가능함을 알 수 있었다. 그러므로 화염이나 플라즈마와 같이 시간에 따라 농도가 변화하는 환경에 응용할 수 있을 것이며, 광섬유의 직경을 작게 한다면 연속발진레이저로 측정된 스펙트럼과 같은 선폭의 스펙트럼을 얻을 수 있을 것이다.

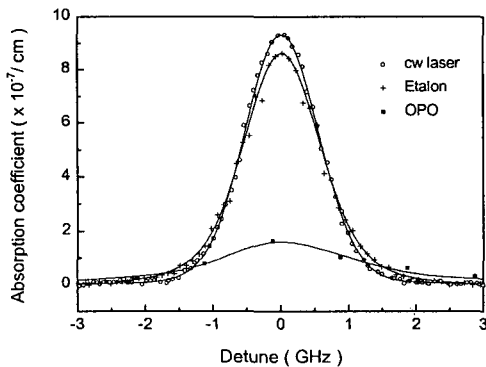


그림 3. 아세틸렌 P(9) 분광선 스펙트럼. 압력은 623 Pa 이고 온도는 25 °C 였다. 실선은 Voigt 함수로 곡선맞춤한 결과이다.

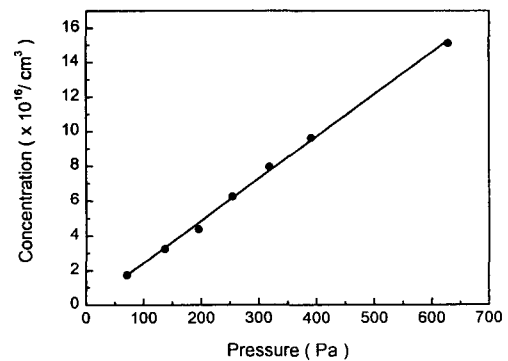


그림 2. 아세틸렌 P(9) 분광선의 농도 측정결과. 실선은 측정된 압력으로부터 얻어진 농도이다.

참고문헌

1. J. J. Scherer, "Ringdown spectral photography", Chem. Phys. Lett. **292**, 143-153 (1998).
2. R. Engeln and G. Meijer, "A Fourier transform cavity ringdown spectrometer", Rev. Sci. Instrum. **67**, 2708-2713 (1996).
3. J. W. Hahn, Y. S. Yoo, J. Y. Lee, J. W. Kim, and H.-W. Lee, "Cavity ringdown spectroscopy with a continuous-wave laser: calculation of coupling efficiency and a new spectrometer design", Appl. Opt. **38**, 1859-1866 (1999).