

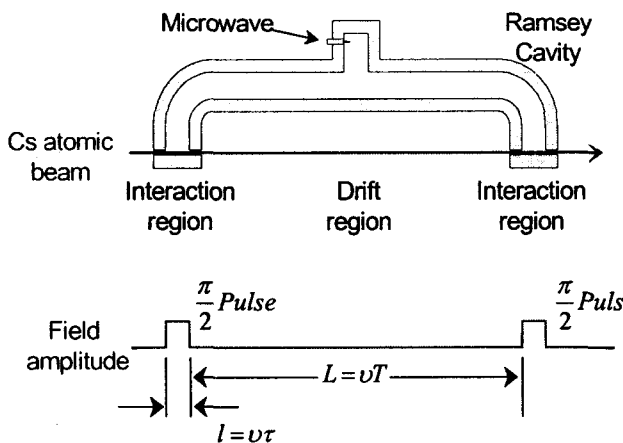
램지 신호의 푸리에 변환을 이용한

세슘 원자빔의 속도 분포 계산

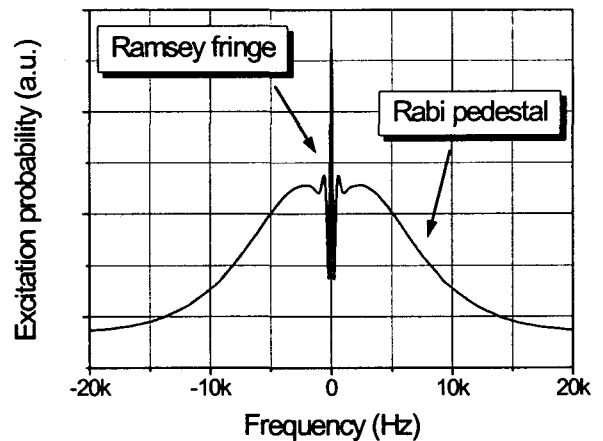
Velocity Distributions Calculated from the Fourier Transforms of Ramsey Lineshapes

박영호, 오차환, 김필수, 권택용*, 신은주*, 이호성*
 한양대학교 물리학과, *한국표준과학연구원 시간주파수그룹
 MrPsi@freechal.com

세슘 원자 주파수 표준기에서 사용되는 램지 방법은 세슘 원자 빔을 U-자형 마이크로파 공진기로 지나게 하여 마이크로파와 시간 간격을 두고 두 번 상호작용하게 함으로써 간섭형 원자 공진 신호를 얻는 방법이다(그림 1). 이 방법을 사용하면 그림 2와 같은 공진 신호를 얻는데 이를 램지 신호라 한다. 원자 주파수 표준기의 정확도 평가를 위해서는 사용된 세슘 원자 빔의 속도 분포를 알아야 하는데, 이 램지 신호를 이용하여 속도 분포를 구할 수 있다. Shirley는 마이크로파 파워를 달리하면서 얻은 램지 신호를 푸리에 변환하고, 가중 평균하는 방식으로 원자 빔의 속도 분포를 계산하였다⁽¹⁾. 본 연구에서는 수정된 Shirley 방법과 반복법(iteration method)을 적용하여 단순한 Shirley 방법보다 더 정확한 속도 분포를 얻었으며 이에 대해서 논의하고자 한다.



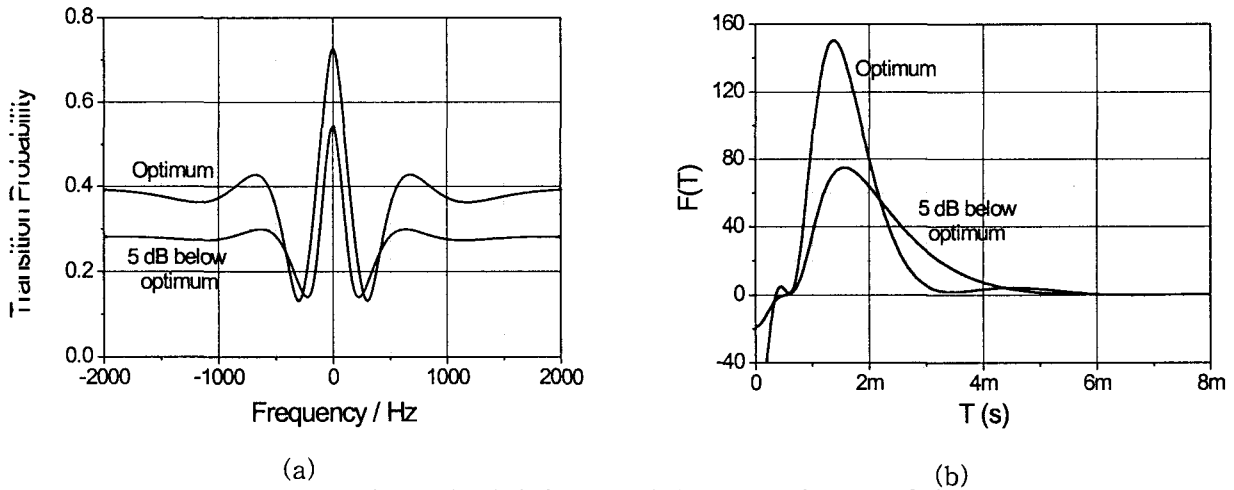
[그림 1] 램지 방식의 장치 구성.



[그림 2] 램지 방법에 의한 원자 분광 신호

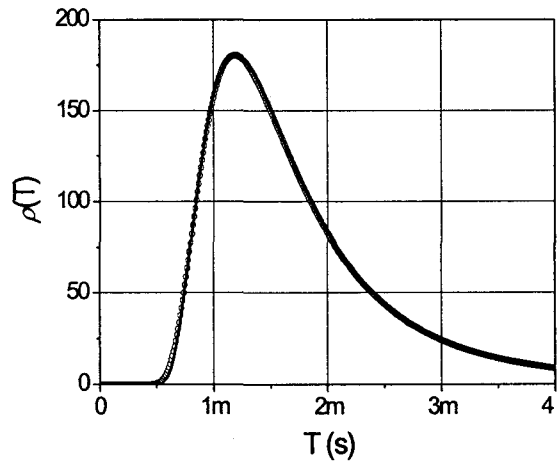
자유전개 영역(drift region)의 길이(L)가 상호작용 영역(interaction region)의 길이(l)보다 충분히 큰 경우 램지 신호는 속도 분포 함수 $\rho(T)$ 와 라비 전이 확률 $\sin^2 aT$ 의 곱에 대한 코사인 푸리에 변환 꼴이 된다. 따라서 이론적으로는 램지 신호를 푸리에 변환한 후 라비 전이 확률로 나누어주면 원자 빔

의 속도 분포를 얻을 수 있으나, 실제에 있어서 라비 전이 확률이 0이 되는 경우 계산 결과가 발산한다는 문제가 있다. 이것은 마이크로파를 π -pulse로 느끼는 특정 속도의 원자들이 램지 신호 형성에 기여하지 않기 때문인데, 마이크로파 세기를 달리하면 π 전이가 일어나는 원자의 속도가 달라지므로 여러 마이크로파 세기에 대한 램지 신호를 사용하여 원자의 속도분포를 구할 수 있다. 그림 3은 램지 공진기에 공급된 마이크로파의 출력이 최적(optimum)일 때와 최적값보다 5 dB 낮을 때의 램지 신호(a)와 그 푸리에 변환(b)을 나타낸다.



[그림 3] 마이크로파 세기에 따른 램지 신호(a)와 그 푸리에 변환(b)

이와 같은 푸리에 변환 방법은 마이크로파의 detuning이 작은 경우의 근사식으로부터 유도된 것이므로 실제의 원자 속도 분포가 정확히 재생되지 않는다. 본 연구에서는 속도 분포 함수와 전이 확률과의 관계가 선형 변환 관계임을 이용하여 반복 알고리즘 방법으로 원자의 속도 분포에 대한 오차를 줄여나갈 수 있었다. 실험으로부터 얻어진 램지 신호를 푸리에 변환하여 속도 분포를 계산하고, 이 속도 분포로부터 전이 확률 공식이 의해 램지 신호를 예측하였다. 예측된 램지 신호는 실제 관측된 것과 차이가 나게 되는데, 이를 다시 푸리에 변환하여 속도 분포의 오차 성분을 계산하였다. 이와 같은 계산을 반복 적용함으로써 원자 빔의 속도 분포에 대한 정확도를 높일 수 있었는데, 그림 4의 실선이 그 결과이다. 그림에서 점선은 $1/v$ 가중치를 고려한 Maxwell 속도 분포인데, 본 연구에서 계산한 속도 분포와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 4] 원자 빔의 속도분포 곡선.
 점선 : Maxwell 분포,
 실선 : 램지신호로부터 계산된 값

1 J. H. Shirley "Velocity distributions calculated from the fourier transforms of Ramsey lineshapes", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, No. 2, pp. 117-121, April. 1997.