

저속원자빔을 이용한 원자시계 설계 및 제작

Design and Setup of an Atomic Clock using Slow Atom Beam

유대혁, 권택용, 이호성, 박영호*, 박상언**

한국표준과학연구원, *한양대학교 물리학과, **한국원자력연구소

dhyu@kriss.re.kr

본 연구에서는 레이저로 원자의 속도를 줄이고 집속하여 얻은 고밀도 저속 원자빔을 이용하여 Ramsey 신호를 얻는 원자 시계를 설계하고 제작하였다. 우선 30 Hz 수준의 Ramsey 신호 선폭을 얻기 위해 40 cm 의 Ramsey 공진기를 설계 제작하였으며 공진주파수를 측정하고, 공진주파수를 시계전이 주파수에 맞도록 튜닝(tuning) 하였다. 제작된 H-plane Ramsey 공진기를 설치할 수 있는 진공조와 정자장을 발생시키기 위한 정자장 발생장치를 설계 제작하였다. 지자장의 영향을 최소화하기 위해 자기 차폐통을 설계 제작하였다.

제작된 H-plane Ramsey 공진기는 TE₁₀ (n=21) 모드 공진기로서 재질은 OFHC (oxygen free high conductive copper)이다. 원자와 마이크로파가 상호작용하는 두 팔 사이의 거리는 395.5 mm로서 원자빔의 속도가 20 m/s 일 때 Ramsey 신호의 선폭은 약 30 Hz 가 된다. 원자가 지나가는 구멍의 크기는 6 mm × 4 mm 이다. 공진기에 마이크로파를 주입하기 위하여 T 자 모양의 H-plane 도파관을 부착하였다. 이 방법을 이용하면 안테나를 이용하는 경우와 달리 공진기에 형성되는 모드에 영향을 주지 않고 마이크로파를 공진기에 공급할 수가 있다. 반사법으로 측정된 Ramsey 공진기의 공진 곡선으로부터 공진주파수를 알 수 있으며 마이크로파 주입 부분을 연마하여 공진주파수를 시계전이 주파수에 맞출 수 있다. 공진기의 주입 부분을 0.3 mm 연마시 공진 주파수는 약 2.395 MHz 높아지는 것으로 측정되었다.

저속 원자빔 원자 시계의 전체 개략도는 그림 1과 같다. 저속 원자빔 원자시계는 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데, 저속 원자빔을 발생시키는 부분과 저속 원자빔으로부터 Ramsey 공진 신호를 얻는 원자빔 튜브 부분이다. 원자빔 튜브는 자성을 띄지 않는 알루미늄으로 제작하였다. 원자빔 튜브는 레이저 냉각 및 광펌핑 영역, 상호작용 영역, 그리고 검출영역으로 나뉘어진다.

레이저 냉각 및 광펌핑 영역에서는 굴절용 레이저에 의해 가열되어 온도가 상승된 원자빔을 횡방향 냉각하여 집속하고, 원자를 바닥준위 F=3 (또는 F=4) 으로 광펌핑시킨다. 이를 위해 그림에서 보는 바와 같이 냉각용 레이저와 광펌핑 레이저가 진행할 수 있는 시창(viewport)을 설치하였다. 시창의 양면은 852 nm 광에 대해 무반사 증착(anti-reflection coating)하였고, 진공과 대기압 사이의 기압 차에 의해 시창이 휘는 현상을 최소화하기 위해 두께가 약 6.4 mm 인 유리 창(glass window)을 사용하였다. 시창과 진공 프렌지(flange) 사이는 고진공용 접착제를 사용하여 고정하였다.

원자 검출영역은 레이저 냉각 및 광펌핑하는 영역과 똑 같은 구조로 만들어져 있다. 저속 원자빔 원자시계의 정확도를 평가할때는 원자빔을 반대로 진행하게 하여 신호를 측정하는 것이 필요한데 이를 위한 것이다.

원자와 마이크로파가 상호작용하는 영역에는 균일한 자장을 가하는데, 자장의 세기는 축퇴

(degeneration)되어 있는 세슘원자의 바닥 준위의 부 준위들이 서로 분리될 수 있을 정도이어야 한다. 저속 원자빔 원자시계의 경우 Ramsey 신호의 선폭이 대략 30 Hz 수준이므로 수 mG의 자장을 가하면 된다. 이 자장의 세기는 지구 자장에 비해 매우 약하기 때문에, 지구 자장을 포함한 주변의 자장을 차폐해야 한다. 이를 위해 3 겹의 원통형 molybdenum-permalloy로써 외부 자장 차폐를 설계 제작하였다. 제작된 자기 차폐통의 차폐율은 100 dB 이상이다.

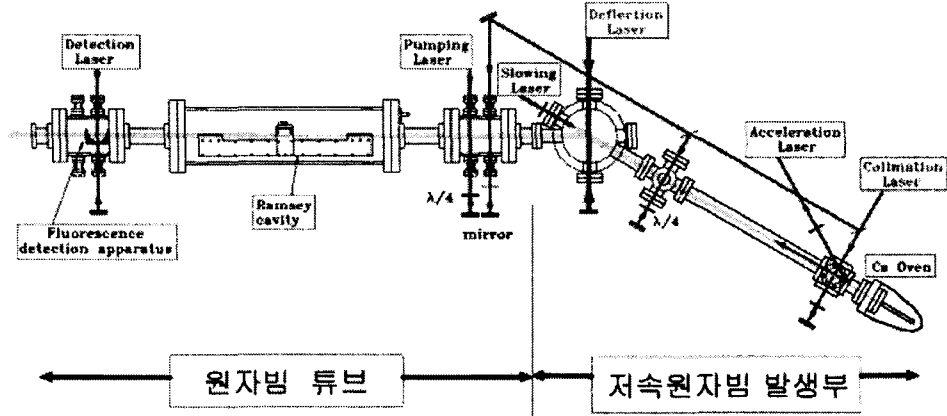


그림 1. 저속원자빔 원자 시계 개략도

상호작용 영역에 정자장을 발생하기 위해서 솔레노이드(solenoid)를 제작하였는데, 솔레노이드 용 보빈 (bobbin)은 자성을 띄지 않는 알루미늄을 선택했다. 솔레노이드 양 끝단에는 추가로 코일을 감아 자기장의 분포가 균일하도록 하였으며, 이론적으로 계산한 자장 분포는 그림 2와 같다. 계산된 자장의 변동폭은 0.05 % 이하인데, 실제 원자빔 튜브내에서 자장을 측정할 경우, 이론적인 예측과 실제 측정된 자장 사이에는 차이가 날 수 있다. 이는 자기 차폐통 내부에 있는 원자빔 튜브 등이 잔류하고 있는 자장의 영향이거나, 고려하지 않은 자기 차폐통의 반사효과, 또는 외부 자장이 완전히 차폐되지 않기 때문이다. 실제 측정 결과와 계산한 결과를 서로 비교해가면서 보상 코일을 설치하여 균일한 자장을 형성할 수 있도록 할 것이다.

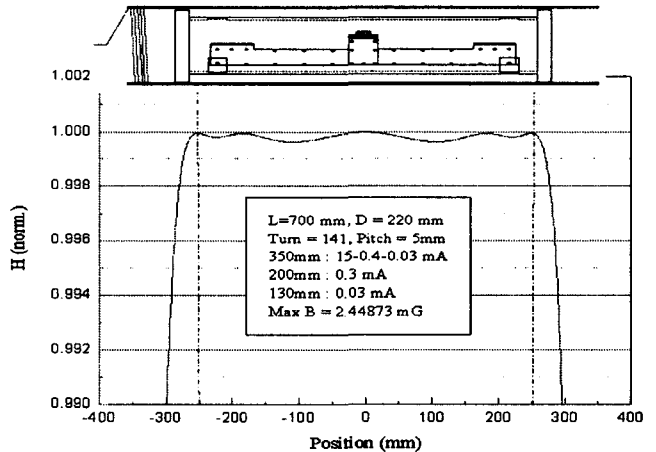


그림 2. 솔레노이드의 자장 분포 계산 결과.

검출영역과 레이저 냉각 및 광펌핑 영역에는 원자로부터 나오는 형광을 수집하기 위한 형광 수집 장치가 설치되어 있다. 원자에서 발생한 형광을 수집하기 위한 형광수집장치는 자성을 띄지 않는 OFHC로 제작하였으며, 반지름이 다른 두 개의 반구로 이루어져 있다. 반구면은 구리에 거울면 가공을 하여 반사율을 높이고, 공기 중에서 산화가 일어나지 않도록 SiO₂로 증착(coating)하였다. 반지름이 작은 반구의 한쪽에 광다이오드(photodiode)를 고정하였으며, 사용된 광다이오드의 수광 면적은 10 mm × 10 mm 이다. 원자에서 발생된 형광은 거의 손실 없이 광다이오드에 도달할 수 있는 기하학적인 구조를 가지고 있으며, 기하학적인 모양에 의한 형광수집효율은 70 % 이상이다.