

## 환경방사성 핵종 $^{90}\text{Sr}$ 의 분석을 위한 자기광학적 포획 연구

고광훈, 정도영, 임권, 김택수, 차용호, 차형기, 김철중  
 한국원자력연구소, 양자광학기술개발부, 대전광역시, 유성구, 사서함 105  
 E-mail : khko@kaeri.re.kr

### 1. 서론

동위원소의 분석은 환경분야 및 지질학, 수문학, 기초과학 등 응용 범위가 넓다[1]. 특히, 스트론튬 동위원소 분석은 지하수 지도, 농산물의 원산지 감식 및 연대측정에서 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 방사성 동위원소  $\text{Sr-90}$ 은 환경 감시 핵종으로 분류되어 수시로 검사가 이루어지도록 되어있다. 동위원소를 분석하기 위하여 질량분석기, 분광기 등이 사용되고 있고, 극미량 방사성동위원소 분석의 경우 LLC(low level counting)[2], Accelerate Mass Spectrometry 등이 사용되고 있다. 그러나, 동중원소(isobar)와 화학적 성질이 같은 물질에 의한 간섭 등으로 분석의 어려움이 있다.

최근 레이저를 사용한 중성원자의 포획 방법이 개발되어 Kr-81, 85 및 Ca-41 등의 극미량 동위원소 분석에 사용되었다[3]. 레이저를 사용한 중성원자 포획 방법은 원자의 고유 전이선을 사용하기 때문에, 타 원자에 의한 간섭을 받지 않을 뿐만 아니라, 선폭이 좁은 레이저광의 사용으로 고분해 분광 분석이 가능하고, 기존 레이저분광법 보다 동위원소 선택도가 높다. 스트론튬 또한, 중성원자의 포획이 가능한 원소로써, 중성원자 포획 방법을 동위원소 분석에 적용하는 논의가 필요하다.

본 논문은 스트론튬 동위원소의 분석에 앞서, 스트론튬 중성원자 포획 시스템 구성과 포획특성에 대하여 논의하였다. 스트론튬 중성원자는 가열방법으로 생성되었고, 제만(Zeeman) 감속기를 통과하면서 포획깊이까지 감속되어 포획 챔버로 입사되었다. 느린 원자는 사중극자 자기장에서 여섯방향으로 입사하는 레이저광에 의하여 공간상에 포획되었다. 로딩 시간은 약 20 ms 이었다.

### 2. 실험 방법

스트론튬 원자의 에너지 준위는 그림 1 과 같다. 포획에 사용된 전이선은  $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^1P_1$  로써 에너지 차이는 460.7 nm 에 해당하며, 전이선의 선폭은 약 32 MHz 이다.  $5s5p\ ^1P_1$  준위에서 손실이 있으나, 순환전이(cycling transition)를 이루어 포획이 가능하다.

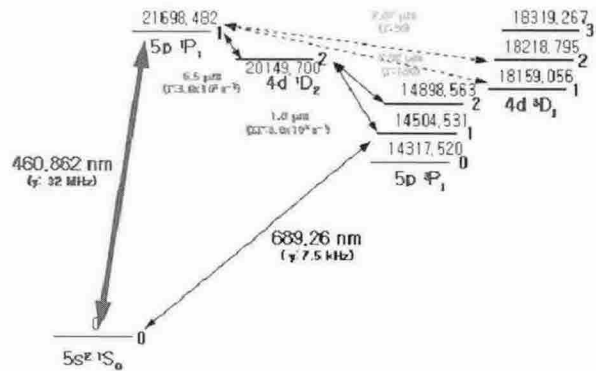


그림 1. 스트론튬 원자의 에너지 준위

스트론튬 원자 빔 발생 장치의 온도는 약  $600\ ^\circ\text{C} \sim 650\ ^\circ\text{C}$  로 유지가 되었으며, 압력이 약  $1.5 \times 10^{-7}$  Torr 로 유지되었다. 발생된 원자는 제만(zeeman) 감속기를 지나 포획 챔버로 입사되었다. 포획 챔버의 압력은 이온 펌프를 사용하여  $5 \times 10^{-8}$  Torr 로 유지하였다.

레이저광으로 UV multi-line 아르곤 이온 레이저로 펌핑되는 고리형 색소레이저를 사용하였다. 고리형 색소레이저는 단일 종모드로 발진되며, 발진된 레이저광의 선폭은 약 500 kHz 정도이다.

레이저광의 일부를 acousto-optic modulator 를 사용하여 주파수를 +110 MHz 이동시킨뒤 포획 챔버의 여섯 방향에서 입사하도록 광학계를 조정하였다. 레이저광의 편광은 우원편광을 유지하도록  $4\lambda$  wave plate 를 사용하였으며, 원자빔 감속을 위한 감속빔 또한 우원편광의 편광을 유지하였다. 레이저빔의 세기 비율은 약 1:1 이었다. 포획 챔버의 중앙에서 4 중극자 자기장의 기울기는 약 30 G/cm ~ 50 G/cm 까지 변화시켰다.

링 색소레이저의 레이저광의 세기는 약 60mW 이고, 일부는 파장을 측정하는 Wavemeter 와 포화흡수분광 장치 및 Hollow cathode lamp 로 입사시켜 레이저의 주파수를 감시하였다. 레이저광의 50%는 acousto-optic modulator 를 통과시켜 주파수가 +110 MHz 이동된 레이저광을 발생시킨뒤 포획광으로 사용된다. Acousto-optic

modulator 의 출력과 셔터를 사용하여, 포획광과 감속광의 세기를 조절하였고, 포획 특성을 측정하였다.

### 3. 실험 결과

레이저와 상호작용을 하면서 원자가 포획되기 때문에, 포획 원자로부터 발생하는 형광을 관찰할 수 있다. 형광은 챔버 바깥에서 Hamamatsu 사의 R928 PMT 를 사용하여 측정하였으며, 레이저 주파수를 변화시키면서 포획된 원자 구름으로부터 발생하는 형광은 그림 2 과 같다. 레이저 주파수가 포획 조건에 맞는 곳에서만 포획이 되는 것을 알수 있고, 포획된 원자구름의 크기는 약 1 mm 정도 이었다.

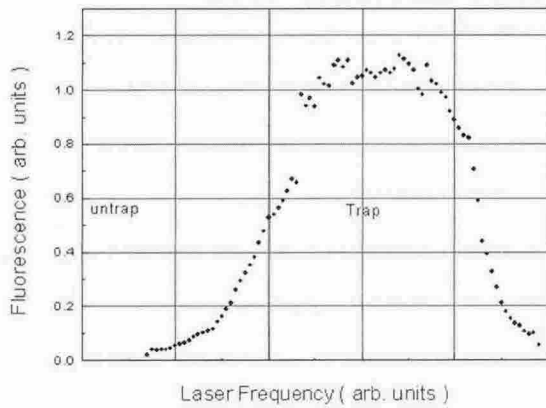


그림 2. 주파수에 따른 형광 변화.

포획가능한 느린 원자의 유입량을  $L$ , 포획원자의 손실을  $\Gamma$  라고 하면, 포획된 원자 개수  $N$  은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = L - \Gamma N$$

(1)

식 (1)은 원자사이의 충돌이 없다고 가정한 근사식으로, 포획광의 세기를 조절하여 포획된

원자의 형광을 측정하면, 손실율과 유입량을 측정할 수 있다. 그림 4 는 포획광을 입사시켰을 때, 포획된 원자에서 발생하는 형광으로, 지수함수로 맞춤하면 약 20 ms 를 얻을 수가 있다. 스트론튬 원자의 경우 포획 수명시간( $\Gamma$ )이 20 ms 로써 매우 짧은데, 이는 상위준위( $5s5p^1P_1$ )에서  $5s4d^1D_2$ 로의 손실이 있기 때문이다.

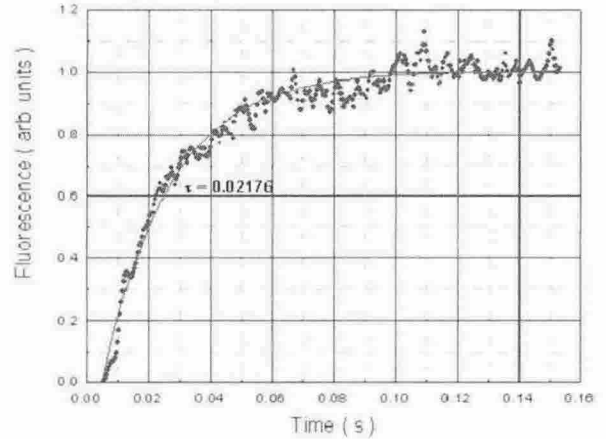


그림 3. 포획원자의 로딩율을 나타내는 형광.

### 3. 결론

자기광학적 포획방법을 사용한 스트론튬 동위원소 분석에 앞서 스트론튬 중성원자를 레이저광을 사용하여 포획하였다. 포획원자의 로딩율을 측정하였고, 차후 원자의 개수를 증가시키는 실험과 동위원소 선택도를 증가시키는 실험이 수행될 것이다.

### 참고문헌

- [1] W. Hening et al., Science Vol. 236, p.725, 1987.
- [2] H. Loosli and H. Oeschger, Earth Planet. Sci. Lett. Vol. 7, p 67, 1969.
- [3] C. Y. Chen, Y. M. Li, K. Bailey, T. P. O'Connor, L. Young, Z.-T. Lu, Science, Vol. 286, No. 5, pp. 1139-1141, 1999.