

## 세슘 원자에 대한 레이저 냉각 및 온도 측정

권택용<sup>†</sup> · 이호성 · 양성훈

한국표준과학연구원 시간주파수 연구실

Ⓣ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2000년 7월 10일 받음, 2000년 10월 12일 수정본 받음)

레이저 냉각법을 이용하여 세슘 원자의 온도를 도플러 냉각 한계온도 보다 낮은 온도까지 냉각하였다. 자기-광 포획된 원자를 더 냉각하기 위해서는 냉각용 레이저의 주파수를 더 적색편이 시켜야 하는데, 이를 위해 본 연구에서는 세슘 원자 흡수선의 Zeeman 이동을 이용하였다. 이 방법으로 레이저 주파수 안정화를 유지하면서 레이저의 주파수를 약 40 MHz 만큼 이동시킬 수 있었다. 비행시간 방법으로 측정한 레이저 냉각된 세슘 원자의 최저온도는  $2.2 \mu\text{K} \pm 0.5 \mu\text{K}$ 이었다. 냉각된 원자의 온도를 레이저의 주파수 및 세기에 따라 측정하였는데, 이광자 냉각 이론에 의한 계산결과와 잘 일치한다는 것을 알았다.

OCIS codes : 020.7010, 300.6520.

### I. 서 론

레이저를 이용하여 원자의 온도를 낮추는 레이저 냉각 기술은 1975년 Hänsch와 Schawlow가 처음으로 제안하였다.<sup>[1]</sup> 1985년 Chu 등이 Na 원자의 온도를 약  $240 \mu\text{K}$ 까지 냉각하는 실험을 처음으로 성공하였다.<sup>[2]</sup> 최근에는 도플러 냉각 방법 이외에도 편광 기울기 냉각(polarization gradient cooling, PGC), 회색(gray) 냉각, 증발(evaporation) 냉각 등과 같은 새로운 냉각 기술이 개발되었고, 이에 따라 원자를 한 개의 광자가 가지는 운동에너지보다 더 낮은 온도까지 냉각할 수 있게 되었다.<sup>[3-5]</sup>

레이저 냉각 기술은 고분해 분광학, Bose-Einstein 응축, 저온 원자들의 충돌 실험, 원자 레이저, 그리고 원자도파관 등의 여러 분야에서 응용되고 있다.<sup>[6-14]</sup> 특히, 레이저 냉각된 원자를 이용하여 보다 정확한 원자 주파수표준기를 개발하려는 연구가 세계 각국의 표준기관이나 대학 등에서 활발히 진행되고 있다. 그 중 대표적인 것으로 원자분수 주파수 표준기가 있다.

원자분수 주파수표준기에 대한 연구는 프랑스의 LPTF (Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences)에서 제일 먼저 시작하였으며 이미 시제품을 제작하였다. 정확도를 평가한 결과 그 불확도가 약  $3 \times 10^{-15}$ 으로, 세계에서 가장 우수한 주파수표준기이다.<sup>[15]</sup> 정확도 평가를 위해서는 시계전이(clock transition) 주파수를 이동시키는 십여가지 오차 요인에 의한 각각의 주파수 이동 값과 그것의 불확도(uncertainty)를 먼저 구한다. 그리고 각각의 불확도를 제곱하여 합한 값의 제곱근을 합성불확도(combined uncertainty)라고 하는데, 이 값으로 원자 주파수표준기의 정확도를 나타낸다. 따라서 불확도가 작을수록 정확도는 높아진다. 현재 미국, 일본, 독일, 스위스 등에서도 원자분수 주파수표준기를 개발하기 위한 연구를 진행 중에 있다.<sup>[16,17]</sup>

본 논문에서는 한국표준과학연구원에서 개발하고 있는 원자분수 주파수 표준기 연구를 위해 선행되어야 하는 원자에 대한 레이저 냉각 실험과 냉각된 원자의 온도 측정 실험에 대해서 보고한다. 그리고 이광자 냉각 이론<sup>[18,19]</sup>에 의한 계산결과와 비교한다.

서로 반대 방향으로 진행되는 세 쌍의  $\sigma^+ - \sigma^-$  편광된 레이저를 사용하여 원자를 자기-광 포획(magneto-optical trap, MOT)한 후, 레이저의 주파수와 세기를 조절하여 원자를 도플러 냉각 한계 온도 보다 낮은 온도로 냉각시켰다. MOT로 냉각된 원자를 보다 낮은 온도로 냉각하기 위해서는 레이저의 주파수를 이동시켜야 하는데, 본 연구에서는 세슘 원자 흡수선의 Zeeman 이동을 이용하였다. 이때 주파수를 이동하는 동안 레이저의 주파수 안정화는 유지되어야 한다. 레이저의 세기 조절은 광음향변조기를 이용하였으며, 냉각된 원자의 온도는 비행시간(time-of-flight, TOF) 법으로 측정하였다.

### II. 이 론

MOT는 anti-Helmholtz 방식으로 구성된 코일을 이용하여 4극의 자장을 발생시켜서 공간상에 원자 포획 우물을 만드는 방법이다. 이때, MOT 내에서의 위치에 따라 원자의 Zeeman 이동이 다르게 되어 원자가 받는 힘이 위치에 따라 달라진다.

서로 수직인 두 원편광(각각,  $\sigma^+$ 와  $\sigma^-$ )의 레이저를 반대 방향으로 진행시키면 속도  $\vec{v}$ 인 원자가 받는 레이저 주파수의 편이(detuning)는

$$\Delta_i = \omega - \omega_0 - \left( \vec{k} \cdot \vec{v} \pm \frac{\mu B}{\hbar} \right) \quad (1)$$

이 된다.

여기서  $\omega$ ,  $\omega_0$ 는 각각 레이저 주파수 및 원자의 공진 주파수이고,  $\vec{k}$ 는 레이저 파수,  $B$ 는 자장의 세기이다. (1) 식의 마지막 항은 Zeeman 효과에 의한 주파수 이동을 나타내는데, +

<sup>†</sup>E-mail: tykwon@kriss.re.kr

는  $\sigma^-$ -편광,  $-$ 는  $\sigma^+$ -편광의 경우이다. 이때 원자는 레이저 진행방향으로 힘을 받게 되는데, 각각의 레이저로부터 원자가 받는 힘은

$$F_{\pm} = \pm \hbar k \frac{I_{\pm}/I_s}{1 + I_{\pm}/I_s + (\Delta/\gamma)} \quad (2)$$

가 된다. (2) 식에서  $F_+$ 와  $F_-$ 는 각각  $\sigma^+$ -편광,  $\sigma^-$ -편광의 레이저에 의해 받는 힘,  $I_{\pm}$ 는 레이저의 세기이고,  $I_s$ 는 원자의 두 준위사이의 포화강도,  $2\gamma$ 는 원자의 자연 선폭이다.

원자는 레이저에 의해 냉각이 될뿐 아니라 들뜬 원자의 자발방출에 의해 가열도 되므로 냉각과 가열이 평형되는 온도까지 냉각될 수 있다. 원자의 에너지 준위를 바닥 상태와 들뜬 상태의 두 개의 준위로 구성된 2-준위계로 고려한 (2) 식에 의해서 냉각될 수 있는 원자의 최저 온도를 도플러 냉각 한계 온도라 한다. 세슘원자의 경우 이 온도는 약 125  $\mu\text{K}$ 이다. 그러나, 실제 MOT에서 관측된 원자의 온도는 도플러 한계온도보다 낮은 수십  $\mu\text{K}$ 이고, 레이저의 디튜닝을 크게하고 레이저의 세기를 약하게 하면 원자는 수  $\mu\text{K}$ 까지 냉각이 가능하다. 이러한 현상들은 도플러 냉각 이론으로 설명될 수 없다.

도플러 냉각 한계온도 이하로 원자의 냉각이 가능한 것을 설명하는 이론으로 Cohen-Tannoudji 등은 편광 기울기 냉각 (Polarization Gradient Cooling, PGC) 이론 모델을 제시하였다.<sup>[20]</sup> 그러나 이 이론으로는 실험 결과를 정량적으로 설명하지 못하는 단점을 가지고 있다. 그런데 S. Chang 등은 이광자 냉각(two-photon laser cooling)이라는 새로운 이론 모델을 제시하였는데,<sup>[18,19]</sup> 본 논문에서는 이 이론을 바탕으로 원자의 온도 등을 계산하였다.

원자의 에너지 준위는 도플러 냉각에서 가정된 2준위 모델과는 달리 각 에너지 준위에 여러 개의 Zeeman 부준위가 있다. 그러므로 원자와 레이저와의 상호작용에 의하여 각 부준위사이에서 원자개수의 재분배가 일어나게 된다. 세슘원자의 경우 레이저 냉각에 이용되는 에너지 준위는 바닥상태( $6S_{1/2}$ )의  $F=4$ 와 제1들뜬상태( $6P_{3/2}$ )의  $F=5$ 인데,  $F=4$ 와  $F=5$ 에는 각각 9개와 11개의 부준위가 있다. 이와 같은 (9+11)-준위의 원자에서 발생하는 전이와 동일한 형태의 전이가 발생하면서 가장 단순한 원자 시스템은 그림 1과 같은 (3+5)-준위 모델이다. 본 논문에서는 시간과 노력을 줄이기 위해 (3+5)-준위 모델로써 세슘 원자의 전이를 설명한다.

서로 반대 방향으로 진행하는  $\sigma^+$ 와  $\sigma^-$  원편광의 레이저에

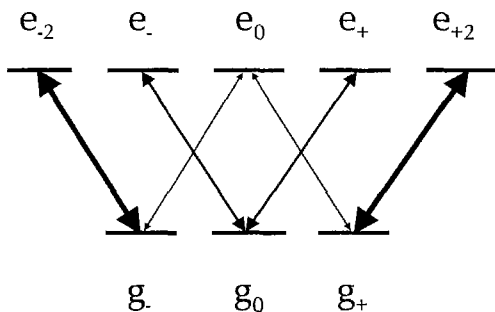


그림 1. 이광자 냉각 메카니즘을 설명하기 위한 (3+5)-에너지 준위.

의해 그림 1과 같이 V...V 형태의 전이가 형성된다. 원자들은 이 과정을 통해서 바닥상태의 부준위들 사이에서 가간섭성 재분배 (coherent redistribution)가 일어나게 된다.

원자가 레이저에 의해 받는 힘은 원자와 레이저 사이의 쌍극자 상호작용의 유효 세기(effective strength)에 의해 결정된다. 유효 세기를 결정하는 Rabi 주파수는  $\Omega = \|\mathbf{d}\|E_0/2\sqrt{5}\hbar$  이며,  $\|\mathbf{d}\|$ 는 축약된 쌍극자 전이 모멘트이다. 이 유효 세기는 원자의 에너지 준위의 점유율에 따라 달라지게 되는데, V...V 형태의 에너지 준위계에서 쌍극자 상호작용의 유효 세기는 전이 확률이 가장 큰 양쪽 가장자리 전이에서 가장 강하다.

레이저의 세기가 충분히 약한 경우에 원자가 레이저에 의해 받는 힘은<sup>[18,19]</sup>

$$F = \hbar k \gamma \frac{G}{1 + \delta^2/\gamma^2} \frac{1}{3\Delta} \left[ 73 + \frac{1}{5} \frac{\mu^2}{\mu^2 + k^2 v^2} \left( \frac{348\delta^2}{5\gamma^2} - 17 \right) \right] \frac{\delta k v}{\delta^2 + \gamma^2} + \hbar k \gamma \frac{G^2}{1 + \delta^2/\gamma^2} \frac{5}{4\Delta} \frac{\delta k v}{\delta^2 + \gamma^2} \quad (3)$$

로 표현된다. 여기서  $\delta = \omega - \omega_0$ 는 레이저의 주파수 편이,  $G = 2\omega^2/\gamma^2$ 는 레이저의 세기를 무단위로 나타낸 포화번호이고,  $\mu = (5/6) \gamma \Omega^2 / (\gamma^2 + (\delta + kv)^2)$ 는 바닥상태 부준위 사이에 형성된 가간섭의 감쇠율을 결정한다. 그리고  $\Delta$ 는 이광자 전이에 의한 포화를 나타내는 것으로

$$\Delta = 11 + \frac{1}{5} \frac{\mu^2}{\mu^2 + k^2 v^2} \left( \frac{51}{5} \frac{\delta^2}{\gamma^2} - 4 \right) \quad (4)$$

이다.

(3) 식에서 첫 번째 항은 하나의 광자를 흡수 또는 방출의 과정에 의해 원자가 서로 반대 방향으로 진행하는  $\sigma^+$ - $\sigma^-$  원편광의 레이저에 의해 받는 힘을 나타내고, 두 번째항은 이광자 전이에 의해 원자가 받는 힘을 나타낸다. (3) 식으로 부터 원자가 레이저에 의해 받는 힘과 원자의 속도와의 관계를 그래프로 나타내면 그림 2와 같다.<sup>[18,19]</sup> 그림은  $G=1$ 이고,  $\delta=-3\gamma$  일 때 계산한 결과인데, 대시선과 점선은 각각 (3) 식의 첫

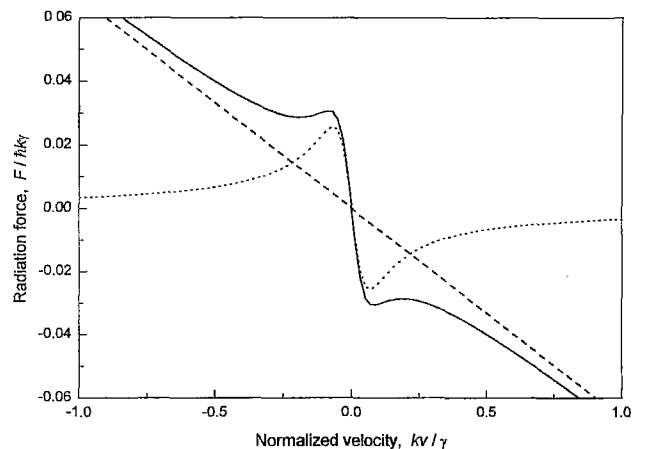


그림 2. 원자가 레이저에 의해 받는 힘과 원자의 속도와의 관계; 대시선은 하나의 광자 전이에 의한 힘이고, 점선은 이광자 전이에 의한 힘이며, 실선은 두 힘을 합한 결과임.

번째항과 두 번째항에 의한 것이고, 실선은 두 항을 합친 결과이다. 원자의 속도가 0인 부근에서 이광자 전이에 의해 힘의 기울기가 크지는 것을 알 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 속도가 느린 원자의 경우 이광자 전이에 의해 레이저 냉각율이 크지게 되어 도플러 한계 온도보다 낮은 온도까지 냉각되는 것이 가능하게 된다.

### III. 실험

본 실험에 사용된 레이저 시스템의 개략도는 그림 3과 같다. 냉각 및 포획용 레이저로는 고풍력(150 mW) DBR 다이오드 레이저(모델 SDL-5722-H1)를, 리펄핑 레이저로는 5 mW 출력의 DBR 다이오드 레이저(모델 YL85XNW/S)를 사용하였다. MOT에서 세 축 방향으로 입사하는 레이저 빔은 렌즈를 이용하여 직경이 약 1 cm가 되도록 확대하였고, 빔의 분포는 가우시안에 가깝도록 광학계를 정렬하였다.

냉각용 레이저는  $F=4 \rightarrow F'=4$  전이선과  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선의 교차 공진선에 주파수 안정화하였으며, MOT의 x축과 y축에 입사하는 레이저 빔은 110 MHz의 광음향 변조기(모델 Brimrose 9628-AO-1362)를 이용하여 주파수를 이동시켜  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선에 대해 약 15 MHz 적색편이 되도록 하였다. 그리고 z축에 입사하는 빔은 원자발사 실험에 사용하기 위해 별도의 광음향 변조기(모델 AA.MT 25)를 사용하여 110 MHz 만큼 주파수를 이동하였다.

MOT에 세 방향에서 입사되는 냉각용 레이저의 각 빔의 세기는 약  $12.7 \text{ mW/cm}^2$ 인데, 광음향 변조기에 입력되는 RF 신호의 세기를 변화시켜 레이저의 세기를 조절하였다. 리펄핑 레이저 빔은 x축과 y축 방향에서 냉각용 레이저와 합쳐지도록 하였으며, 각 리펄핑 레이저 빔의 세기는 약  $1.6 \text{ mW/cm}^2$ 였다. 그리고 편광 셔터(모델 Displaytech LV100)를 이용하여 세 축 방향의 레이저 빔을 차단할 수 있도록 하였다.

도플러 냉각된 원자를 보다 낮은 온도로 냉각하기 위해서는

레이저의 주파수 편이를 크게 해야 한다. 이를 위하여 세슘셀에 코일을 감아 흡수선을 Zeeman 이동시킬 수 있도록 하여, 세슘원자의 흡수선( $F=4 \rightarrow F=5'$ ) 보다 약 55 MHz 낮은 주파수로 이동시켰다. 이때 레이저의 주파수는 세슘원자의 교차공진선에 안정화되어 있는데, Zeeman 이동을 하는 동안 주파수 안정화는 유지되어야 한다.

MOT에 포획된 원자구름과 주위의 원자들과 충돌에 의한 효과를 줄이기 위해서는 진공조는 고진공을 유지해야 한다. 이를 위하여 MOT를 중심으로 위쪽에 20 L/s 용량의 이온 펌프를, 아래쪽에 60 L/s 용량의 이온 펌프를 설치하였다. 진공조의 진공도는 약  $2.7 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 이었다.

MOT 부근에서 지자장을 포함한 외부 자장의 효과를 제거하기 위하여 세 쌍의 Helmholtz 코일을 세 방향(x, y, z)으로 설치하여 원자가 포획되는 지점에서 자장이 영이 되도록 하였다. 이를 확인하기 위하여 두 가지 실험을 하였다. 먼저, 냉각용 레이저 빔은 차단하지 않고 anti-Helmholtz 코일에 흐르는 전류만 차단하였을 때 원자구름의 형광을 관측하였다. 코일에 흐르는 전류를 차단하는 순간 외부 자장이 제거되지 않았을 경우에는 자장이 0인 지점을 향하여 원자구름이 빠르게 움직여서 사라지고, 외부 자장이 제거되었을 때에는 원자구름의 중심은 움직이지 않고 서서히 퍼져 나가는 것을 관측할 수 있었다. 두 번째는 MOT의 아래쪽에 조사광을 지나게 하고 트랩을 풀었을 때 자유 낙하하는 원자구름이 조사광을 가로질러 가면서 발생하는 형광을 관측하였다. 이 두 가지 실험으로 광-자기 트랩 부근에서 외부 자장이 상쇄되었음을 알 수 있었다.

### IV. 결과 및 토론

MOT에 포획된 세슘 원자의 온도를 TOF 방법으로 측정하였다. 이때 레이저의 주파수는 세슘원자의  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선 보다 15 MHz 적색편이 되어 있었다. 원자의 온도는 관측

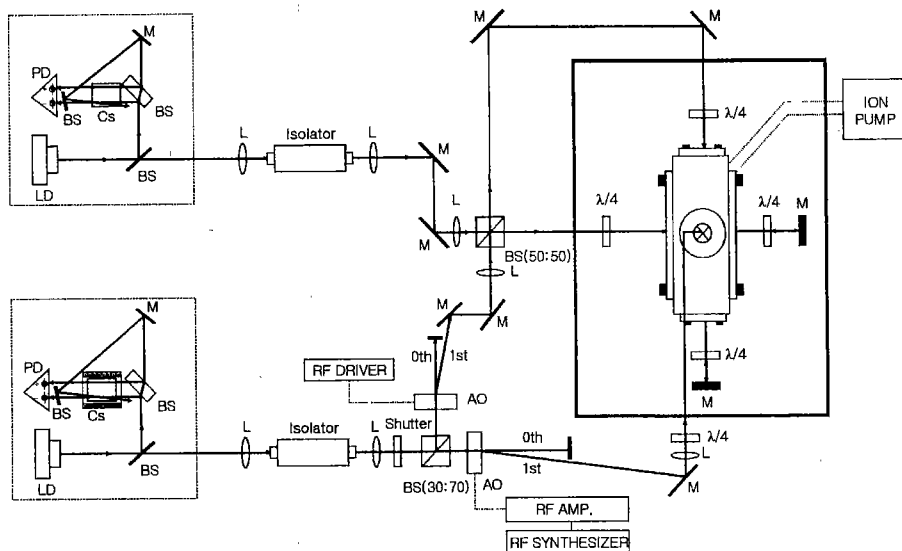


그림 3. 자기-광 포획 및 레이저 냉각을 위한 실험 장치 개략도.

된 형광 신호를 최적화하여 구하였다. 이때 원자의 밀도분포는 가우시안 분포로, 원자의 속도분포는 맥스웰 분포로 가정하였다. 이렇게 구한 원자의 근제곱 평균속도  $v_{rms}$ 는 약 8.9 cm/s였으며,  $T = m v_{rms}^2 / 3k_B$ 로부터 구한 원자의 온도는 약 42  $\mu$ K이었다. MOT로부터 아래 방향으로 2.4 cm인 떨어진 지점과 17.4 cm 떨어진 지점에서 각각 TOF 신호를 측정하였는데 같은 결과를 보여주었다.

도플러 냉각된 원자의 온도를 더 낮추기 위해서는 레이저 주파수의 편이, 레이저 빔의 세기, anti-Helmholtz 코일의 전류, 그리고 Zeeman 코일의 전류 등을 시간 간격을 두고 작동하여야 한다. 이를 위해 이러한 장치를 자동화하는 신호 발생기를 제작하여 사용하였다.

냉각용 레이저의 주파수는 흡수선의 Zeeman 이동을 이용하여 세습원자의  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선에 대하여 -15 MHz에서 -55 MHz까지 조절하였다. 그림 4에서 점선은 포화흡수분광에 사용되는 세습셀에 감은 솔레노이드 코일에 전류를 흘리지 않았을 때의 포화흡수 스펙트럼이고, 실선은 전류를 약 1.5 A 가하여 흡수선을 Zeeman 이동시켰을 때의 포화흡수 스펙트럼이다. 다이오드 레이저의 주파수는 세습 원자의  $F=4 \rightarrow F'=4$  전이선과  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선 사이에 나타나는 교차공진선(그림 4에서 굵은 화살 표시)에 안정화하였다. 레이저 주파수를 광음향 변조기를 이용하여 110 MHz 이동시켜서 레이저 주파수가 세습원자의  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선에 대해 -15 MHz 편이된 상태에서 Zeeman 코일에 전류를 흘려 40 MHz 만큼의 Zeeman 주파수 이동으로 -55 MHz의 편이 되도록 하였다.

교차 공진선에 다이오드 레이저의 주파수를 안정화시킨 상태에서 세습셀에 감은 솔레노이드 코일에 전류를 흘렸을 때 흡수 신호의 세기 변화를 측정된 결과가 그림 5에 나와 있다. 코일에 전류를 흘려주면 그림 4에서 보는 바와 같이 교차 공진선의 흡수의 세기가 바뀌게 된다. 레이저의 주파수는 교차 공진선의 흡수 피크에 안정화되어 있으므로 흡수 신호의 세기를 측정하면 Zeeman 주파수 이동을 확인할 수 있다. 전류 스위치를 켜 후 약 2 ms 지난 후부터 Zeeman 이동된 흡수선에 안정화되는 것을 볼 수 있는데, 이때 주파수 안정화는 계속

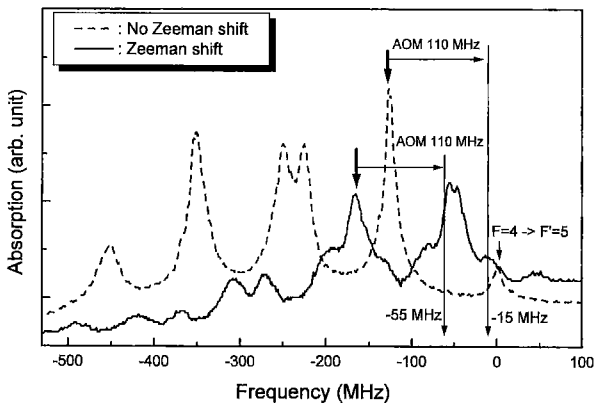


그림 4. 세습원자의 포화흡수 스펙트럼; 점선은 Zeeman 이동되지 않은 흡수 스펙트럼이고, 실선은 Zeeman 이동된 흡수 스펙트럼임. 굵은 화살표는 냉각용 레이저의 주파수가 안정화되어 있는 교차 공진선을 나타냄.

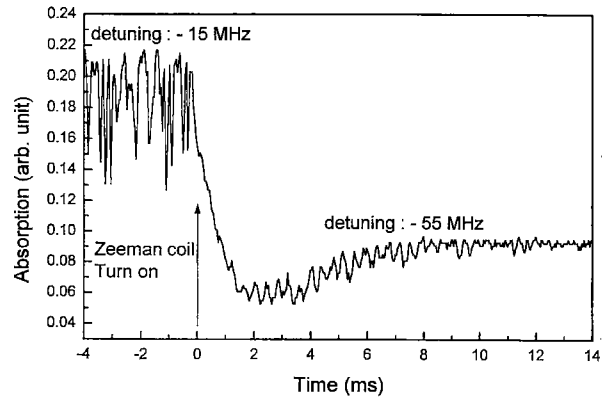


그림 5. 주파수 안정화된 레이저의 Zeeman 이동시 흡수 신호 변화; -15 MHz에서 -55 MHz로 주파수 편이됨.

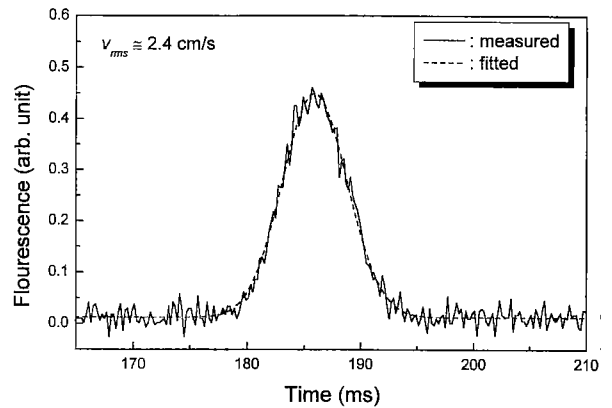


그림 6. 레이저 냉각된 원자의 비행시간(TOF) 신호(실선)와 최적화 신호(점선).

유지되었다. Zeeman 코일의 전류를 반복적으로 on-off 하여 레이저 주파수가 세습 원자의  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선에 대해 -15 MHz와 -55 MHz의 편이를 반복하도록 하였다. 이때 반복 주기, 냉각 시간 등은 제작한 신호 발생기로 조절하였다.

레이저 냉각된 원자의 TOF 신호를 측정된 결과가 그림 6에 나와 있다. 이때 각 방향으로 입사되는 감소된 레이저의 세기는 약 5.1 mW/cm<sup>2</sup>이며, 냉각지점에서 약 17.4 cm 아래 지점에서 형광을 관측하였다. 관측된 TOF 신호로부터 구한 온도는 약 4  $\mu$ K이었다.

레이저 주파수의 편이에 따라 냉각된 원자의 온도를 측정된 것이 그림 7이다. 디튜닝이 크짐에 따라 원자의 온도는 낮아짐을 알 수 있다. 본 실험에서는 흡수선의 Zeeman 이동의 한계(Zeeman 이동을 크게하면 포화흡수 스펙트럼이 변형됨) 때문에 주파수 편이를 -55 MHz 까지만 할 수 있었다. 그림 7의 측정 결과에서 보는 바와 같이 레이저 주파수 편이가 더 커지더라도 원자의 온도는 크게 낮아지지 않았다. 이 실험 결과는 이광자 냉각 이론에 의한 계산결과<sup>[18,19]</sup>와 잘 일치하고 있다.

레이저의 세기에 따른 냉각된 원자의 온도를 측정된 결과가 그림 8에 나와 있다. 레이저의 세기를 약하게 함에 따라 원자의 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 이는 레이저의 세기

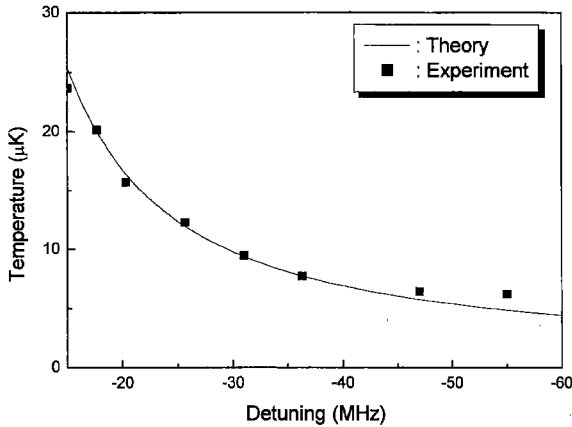


그림 7. 레이저 주파수의 편이에 따른 레이저 냉각된 원자의 온도 변화; 단, 각 레이저 빔의 세기는 약  $5.1 \text{ mW/cm}^2$ 이고, 실선은 이광자 냉각 이론에 의한 계산 결과임.

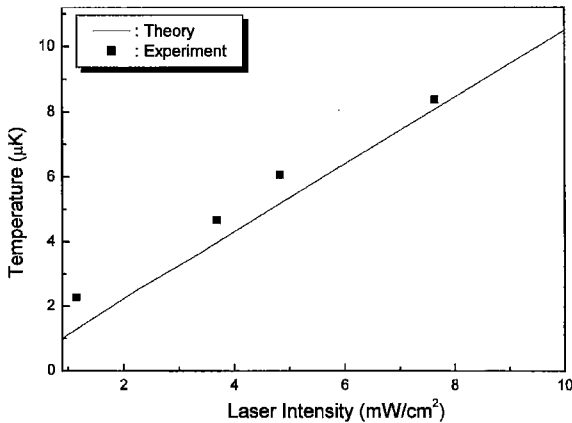


그림 8. 레이저의 세기에 따른 레이저 냉각된 원자의 온도; 레이저 주파수는 세슘 원자의  $F=4 \rightarrow F'=5$  전이선에 대해  $-55 \text{ MHz}$  편이되어 있고, 실선은 이광자 냉각 이론에 의한 계산 결과임.

가 약해짐에 따라 레이저에 의한 가열 효과가 줄어들기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 본 실험에서 측정된 세슘 원자의 최저 온도는  $2.2 \mu\text{K} \pm 0.5 \mu\text{K}$ 이었다.

### V. 결 론

본 연구에서는 세슘 원자를 자기-광 포획한 후 도플러 냉각 한계온도 이하로 냉각하였다. 본 실험에서 레이저 냉각으로 얻은 최저 온도는  $2.2 \mu\text{K} \pm 0.5 \mu\text{K}$ 였다. 레이저 냉각을 위한 레이저 주파수의 이동은 세슘 원자 흡수선의 Zeeman 이동을 이용하였는데, 레이저 주파수를 안정화한 상태에서 약 2 ms 지난 후 레이저 주파수를 약 40 MHz 만큼 이동시킬 수 있었다. 그리고 레이저 주파수의 편이, 레이저의 세기 등에 따른 원자의 온도를 측정하였고, 실험 결과는 이광자 냉각 이론에 의한 계산결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이광자 냉각 이론을 이용한 계산에 도움을 주신 한남대학교 장수 교수님과 러시아 분광학연구소의 V. Minogin 교수님께 감사드립니다. 본 연구는 과학기술부에서 시행하는 국가지정 연구실(NRL) 사업에서 일부 연구비 지원을 받았습니다.

### 참고문헌

- [1] T. W. Hänsch and A. L. Schawlow, *Opt. Comm.* **13**, 68 (1975).
- [2] S. Chu, Hollberg, J. Bjorkholm, A. Cable, and A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48 (1985).
- [3] A. M. Steane and C. J. Foot, *Europhy. Lett.* **14**, 231 (1991).
- [4] J. Reichel, F. Bardou, M. Ben Dahan, E. Peik, S. Rand, C. Salomon, and C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4575 (1995).
- [5] D. Boiron, A. Mich, P. Lemonde, Y. Castin, C. Salomon, S. Weyers, K. Szymaniec, L. Cognet, and A. Clairon, *Phys. Rev. A* **53**, R3734 (1996).
- [6] M. A. Kasevich, E. Riis, and S. Chu, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 612 (1989).
- [7] P. Pillet, C. Valentin, R. L. Yuan, and J. Yu, *Phys. Rev. A* **48**, 845 (1993).
- [8] K. Gibble and S. Chu, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1771 (1993).
- [9] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
- [10] M. O. Mewes, M. R. Andrews, D. M. Kurn, D. S. Durfee, C. G. Townsend, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 582 (1997).
- [11] G. Timp, R. E. Behringer, D. M. Tennant, and J. E. Cunningham, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1636 (1992).
- [12] J. P. Yin, Y. Lin, K. I. Lee, H. Nha, H. R. Noh, Y. Z. Wang, K. Oh, U. C. Paek, and W. Jhe, *J. Korean Phys. Soc.* **33**, 362 (1998).
- [13] Kwaniil Lee, Jong-An Kim, Kihwan Kim, Chang-Yeon Won, Seung Hyup, Unyob Shim, Xinye Xu, and Wonho Jhe, *J. Korean Phys. Soc.* **35**, 115 (1999).
- [14] M. S. Jun, C. Y. Park, and D. Cho, *J. Korean Phys. Soc.* **33**, 260 (1998).
- [15] A. Clairon, S. Ghezali, G. Santarelli, P. Laurent, S. N. Lea, M. Bahoura, E. Simon, S. Weyers, and K. Szymaniec, *Proc. 15th Symp. Freq. Standards Metrology*, 49 (1995).
- [16] C. R. Ekstrom and E. A. Burt, *IEEE Int. Freq. Contr. Symp.* **23** (1998).
- [17] S. Ohshima, T. Kurosu, T. Ikegami, and Y. Nakadan, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L1170 (1995).
- [18] S. Chang, T. Y. Kwon, H. S. Lee, and V. G. Minogin, *Phys. Rev. A* **60**, 2308 (1999).
- [19] S. Chang, T. Y. Kwon, H. S. Lee, and V. G. Minogin, *Phys. Rev. A* **60**, 3148 (1999).
- [20] J. Dalibard and C. Cohen-Tannoudji, *J. Opt. Soc. Am. B* **6**, 2023 (1989).

### Laser cooling and temperature measurement of cesium atoms

Taeg Yong Kwon<sup>†</sup>, Ho Seong Lee, and Sung Hoon Yang

*Time and Frequency Lab., KRISS, Taejon 305-340, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: tykwon@kriss.re.kr*

(Received July 10, 2000 ; Revised manuscript received October 12, 2000)

We cooled cesium atoms below the Doppler cooling limit by laser cooling. For this deep cooling of atoms, the laser frequency was shifted by using the Zeeman shift of an absorption line of cesium. The stabilization of the laser frequency was maintained while the laser frequency was shifted by 40 MHz within 2 ms. The lowest temperature of the laser-cooled cesium atoms was  $2.2 \mu\text{K} \pm 0.5 \mu\text{K}$  in this experiment. We measured the temperature of the laser-cooled cesium atoms as a function of the frequency detuning and the intensity of the cooling laser. The results agreed well with the ones calculated by two-photon laser cooling theory.

*OCIS codes* : 020.7010, 300.6520.