

레이저 광압을 이용한 세슘 원자빔의 집속

박상언 · 조 혁

충남대학교 물리학과

권택용 · 양성훈 · 이호성

한국표준과학연구원, 시간주파수 연구실

(2000년 5월 2일 받음, 2000년 6월 20일 수정본 받음)

세슘오븐에서 방출되는 열원자빔에 대해 횡방향 냉각을 실시하여 원자빔을 집속하였다. 이를 위해 원자빔의 진행방향에 수직으로, 서로 반대방향으로 진행하는 σ^+ 와 σ^- 의 원편광 레이저를 비추었다. 그 결과, 원자의 횡방향 속도 성분에 해당하는 온도를 430 mK에서 약 60 μ K로 냉각시킬 수 있었다. 그리고 서로 반대 방향에서 진행하는 냉각용 레이저광의 세기가 다를 경우와 원자빔에 자장을 가하는 경우에 원자빔의 공간적 분포가 달라지는 것을 관찰하였고, 도플러 냉각이론을 이용하여 정성적으로 설명하였다.

OCIS codes : 140.7010, 190.4180, 020.0020.

I. 서 론

1985년 S. Chu^[1] 등에 의해 빛풀(optical molasses)이 처음으로 관측된 이후, 광압을 이용한 중성원자의 조작과 냉각 및 포획실험은 여러 나라에서 활발히 진행되고 있다. 이러한 레이저 냉각(laser cooling)기술은 원자시계개발,^[2] 원자광학실험,^[3] 저온원자 충돌실험,^[4] 리소그라피(lithography)에 응용,^[5] Bose-Einstein 응축 실험,^[6] 원자레이저 발생^[7] 등에 사용되고 있다.

도플러 냉각 이론에 의하면 빛풀에서 냉각된 세슘원자의 한 계온도^[8]는 127 μ K이지만, 실제 실험에서는 수 μ K까지 냉각되었다.^[9] 도플러 냉각온도 이하의 이런 실험결과를 설명하기 위해 Cohen-Tannoudji 등은 편광 구배 냉각(polarization gradient cooling)이론^[10]을 제시하였다. 그런데, 최근 S. Chang등은 σ^+ - σ^- 편광배열에서 2광자 레이저 냉각이론^[11,12]을 제시하였으며, 이 이론에 의해 계산된 원자의 냉각온도가 실험결과와 정량적으로 잘 일치하는 것으로 보고되었다.

열원자빔은 진행하면서 발산하기 때문에 원자의 밀도는 진행거리의 제곱에 반비례하여 급격하게 감소하게 된다. 이 때문에 고밀도의 원자빔이 필요한 실험에서는 원자빔을 집속시키는 것이 중요하다.

원자빔을 집속하는 방법으로는 레이저광의 산란력(scattering force)을 이용하는 방법,^[13,14] 쌍극자력(dipole force)을 이용하는 방법,^[15] 편광 구배력을 이용하는 방법,^[16] VSCPT(Velocity-Selective Coherent Population Trapping)를 이용하는 방법^[17]등이 있다.

본 논문에서는 100°C로 가열한 세슘오븐에서 발생하는 열원자빔을 σ^+ - σ^- 편광배열의 레이저를 이용하여 빛풀(optical molasses)을 형성시켜 일차원 횡방향 냉각을 하였다. 냉각된 원자빔의 공간적인 분포를 열선 검출기(hot wire detector)를 이용하여 측정하였다. 그리고 두 레이저광 세기가 다른 경우

와 정자장이 가해진 경우 원자빔의 냉각을 관찰하였다. 원자 냉각용 레이저로는 $F=4 \rightarrow F=5$ 의 전이선 부근에 주파수 안정화된 레이저를 사용하였고, 바닥상태 $F=3$ 에 있는 원자를 리펌핑(repumping) 하기 위해 $F=3 \rightarrow F=4$ 의 전이선에 주파수 안정화된 레이저를 추가로 사용하였다.

II. 도플러 냉각 이론

도플러 냉각 이론에서, 서로 반대방향으로 진행하는 동일한 주파수의 레이저광과 원자가 상호작용을 할 때 원자는 레이저광의 진행방향으로 힘을 받게 되는데 각각의 레이저로부터 원자가 받는 힘은 다음과 같이 표현된다.^[18]

$$F_{\pm} = \pm \hbar k r \frac{I_{\pm}/I_0}{1 + I/I_0 + [(\delta \mp kv \mp \Delta f_B)/\gamma]^2} \quad (1)$$

여기서 δ , I_{\pm} , k 는 각각 레이저의 주파수 편이(detuning), 레이저 세기 및 파수이다. I_0 는 두 준위사이의 포화강도, 2γ 는 원자의 자연 선폭, v 는 원자의 속도, $\hbar k$ 는 광자의 운동량이다.

위 식의 분모에서 $(\delta \mp kv \mp \Delta f_B)$ 는 원자가 느끼는 레이저광의 총 주파수 편이인데, kv 는 원자의 속도에 의한 도플러 이동을 나타내고, $\Delta f_B (= \mu_B B/\hbar)$ 는 제만(Zeeman) 효과에 의한 주파수 편이를 말한다. 단, B 는 자장의 세기, μ_B 는 보어 마크네톤(Bohr magneton), \hbar 는 플랑크 상수이다.

양방향에서 오는 레이저에 의해 원자가 받는 총 힘은 레이저의 세기가 약한 경우($I_{\pm}/I_0 \ll 1$ 일 때), 각각의 힘의 합으로 표현된다. 즉, $F = F_+ + F_-$ 이다. 그런데 두 레이저의 세기가 달라지면 F_+ 와 F_- 의 크기가 달라지고 이에 따라 원자들의 속도에 따라 받는 총 힘(F)도 달라진다. 레이저 세기의 비대칭성에 의해 원자가 받는 힘을 계산한 결과가 그림 1에 나와있다.

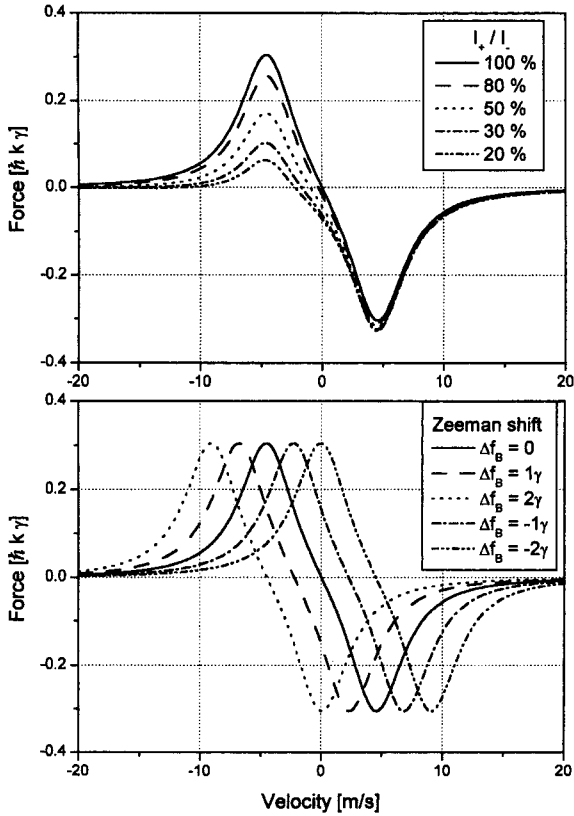


그림 1. 도플러 냉각이론으로 계산한 광압. (a) 두 레이저광 세기의 불균일에 따른 광압의 변화($\delta = -2\gamma$)와 (b) 레이저의 진행 방향으로 정자장이 가해질 때 광압의 변화($\delta = -2\gamma$, $I_{\pm}/I_0 = 0.5$).

그림 1(a)는 I_{\pm} 와 I 가 서로 다른 경우이다. 이때 레이저 주파수 편이는 -2γ , I_{\pm}/I_0 는 0.5로 두고 계산하였다. 그림에서 두 레이저의 세기가 같은 경우(실선)에는 속도에 따라 원자가 받는 힘은 좌우 대칭을 이루고, 정지 상태(즉, 속도가 0인)의 원자들은 전혀 힘을 받지 않는다. 그러나 어느 한쪽의 레이저 세기가 약해지면 속도에 대한 힘의 분포가 비대칭적이 되고, 동시에 힘이 0인 속도가 바뀌는 것을 알 수 있다.

그런데 식 (1)에서 알 수 있는 것처럼, 원자에 자장을 가하여 에너지 준위를 제만 이동시키는 경우에도 원자가 받는 힘을 조절할 수 있다. 그림 1(b)는 σ^+ 와 σ^- 편광을 가진 레이저광이 서로 반대 방향에서 원자에 비취질 때, 자장의 세기가 달라지면 원자가 받는 힘이 속도에 따라 달라지는 것을 보여 준다. 자장이 없는 경우(실선)에는 원자의 자기 부준위들이 축퇴되어 있기 때문에 마찰력은 속도가 0인 원자를 중심으로 대칭적이다. 그러나 자장이 존재하는 경우에는 제만 효과에 의해 자기 부준위들이 이동하게 되고, 정지한 원자의 입장에서 보면 σ^+ 편광 레이저와 σ^- 편광 레이저의 주파수 편이를 서로 다르게 느끼게 된다. 이에 따라 속도성분에 의한 도플러 이동과 제만 에너지 준위의 이동이 같은 원자들은 힘을 받지 않게 된다. 자장의 크기가 증가하면 자기 부준위의 이동도 증가하므로 마찰력이 0이 되는 속도도 변하게 된다.^[19]

두 레이저광의 세기가 같고($I = I_{\pm} = I$), 자장이 0, 레이저의

주파수는 적색편이($\delta < 0$), $|kv| \ll \delta$, $|kv| \ll \gamma$ 인 경우, 원자가 받는 힘은 $F = -\alpha v$ 라고 쓸 수 있다. 이때 마찰계수 α 는 다음과 같다.^[20]

$$\alpha = -4 \hbar k^2 \frac{I}{I_0} \frac{(\delta/\gamma)}{[1 + (\delta/\gamma)^2]^2} \quad (2)$$

원자는 마찰계수 α 인 마찰력에 의해 냉각되지만, 또 한편으로는 무작위로 일어나는 자발방출에 의해 가열이 된다.

원자의 가열과 관련된 운동량 확산계수 D_p 는 $I/I_0 \ll 1$ 인 경우

$$D_p = -4 \hbar k^2 \gamma \frac{I/I_0}{1 + (\delta/\gamma)^2} \quad (3)$$

으로 표현된다.^[20]

냉각율과 가열율이 같아질 때 평형상태에 도달하며, 이때 도플러 냉각의 한계온도는 $T_d = \hbar\gamma/k_b$ (단, k_b 는 볼츠만 상수)이다.

III. 실험

원자빔을 집속시키고 또 공간적인 분포를 측정하기 위한 실험장치도가 그림 2에 나와 있다. 세슘 원자빔은 내경이 약 7 cm인 진공상태의 스테인레스 스틸 튜브 속을 진행한다. 진공을 만들기 위해서 240 L/s 이온펌프를 부착하였으며, 정상상태에서의 진공도는 1×10^{-8} Torr이었다.

세슘오븐은 100°C 로 가열하였는데, 이때 원자빔의 최확속도는 약 260 m/s이고, 맥스웰 속도분포를 이룬다. 세슘오븐의 출구(직경 1 mm)로부터 50 mm 떨어진 위치에 또 다른 직경 1 mm의 구멍을 두어 콜리메이터 역할을 하도록 하였다. 두 구멍을 통과한 원자빔은 약 20 mrad의 퍼짐각을 가진다. 따라서 260 m/s의 최확속도를 가진 원자의 횡방향 속도성분은 약 5.2 m/s이며, 이것을 온도로 환산하면 430 mK 정도이다.

콜리메이터에서 70 mm 떨어진 곳에서 원자빔과 수직인 방향으로 레이저광을 입사시킨 후 반대쪽에서 거울로 되반사시켰다. 이때 진공조로 입사되는 레이저광과 반대편에 있는 반사경 앞에 각각 $\lambda/4$ 판을 놓아 σ^+ 와 σ^- 편광배열이 되도록 하였다. 그리고 레이저가 입사되는 진공조 주위에 세 쌍의 헬름홀츠 코일을 설치하여 지자장을 상쇄시키고 또 정자장을 가하는데 사용하였다.

본 실험에서 사용한 냉각용 레이저는 선폭이 약 1 MHz 인 DBR 반도체 레이저(Yokokawa YL85XNW/S)이고, 레이저광 단면의 크기는 대략 15 mm × 5 mm이다. 원자빔으로 입사되

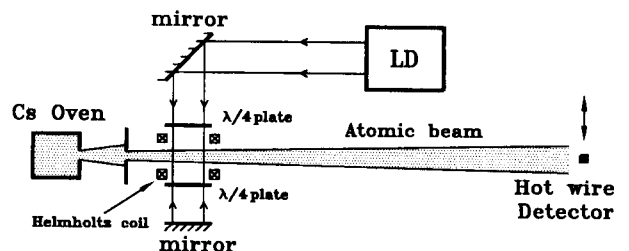


그림 2. 세슘원자빔 집속 및 검출을 위한 실험장치도.

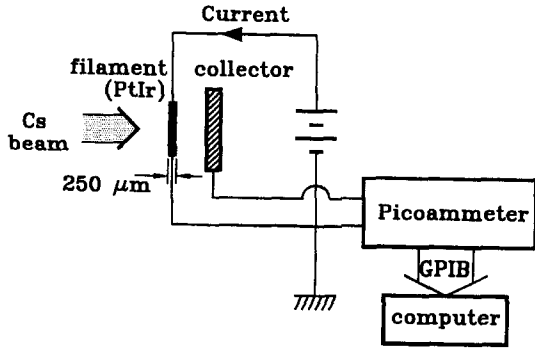


그림 3. 세슘원자빔의 공간분포 측정에 사용된 열선 검출기의 개략도.

는 출력은 5 mW이다. 그리고 리펄핑 레이저는 선폭이 약 20 MHz, 최대출력 20 mW인 반도체 레이저를 사용하였다. 세슘 증기셀에서 관측되는 포화흡수 분광신호를 이용하여 레이저의 주파수를 모니터 하거나 주파수를 안정화하였다. 또한 세슘 증기셀 주위에 솔레노이드 코일을 감고 자장을 발생시켜서 제만 효과에 의해서 포화흡수신호가 이동^[21]하는 것을 이용하여 레이저의 주파수를 미세하게 조절하였다.

원자를 집속 시키는 지점에서 502 mm와 1052 mm 떨어진 곳에서 원자빔의 공간적인 분포를 열선 검출기의 위치를 바꾸어 가며 측정하였다.

그림 3은 원자빔의 공간적 분포를 측정하는데 사용된 열선 검출기의 개략도이다.

열선 검출기는 중성원자를 검출하는 방법중의 하나로 이온화 에너지가 낮은 원자가 높은 일함수를 가진 가열된 금속표면에 충돌하면서 원자로부터 전자가 금속표면으로 전달되는 현상을 이용한 것이다. 이와 같은 현상을 표면이온화(surface ionization)라고 한다.^[22] 알칼리 원자들의 경우 외각에 약하게 구속된 1개의 전자를 가지고 있으므로 다른 원자들에 비해 비교적 낮은 이온화 에너지를 가지고 있으며, 특히 세슘의 경우 이온화 에너지가 3.9 eV로 매우 낮기 때문에 표면이온화가 쉽게 이루어진다. 열선 검출기에 사용하된 열선은 일함수가 큰 금속을 사용하는데 텅스텐(W)의 경우 약 4.5 eV으로 Cs, Rb, K 원자들을 검출하는데 사용할 수 있다. 백금(Pt)의 경우 일함수가 5.1 eV로 Na, Li 원자까지 이온화시킬 수 있는 높은 일함수를 가지고 있다.

본 실험에 사용된 열선은 폭 250 μm, 길이 1 mm인 PtIr 리본으로, 일함수가 높을 뿐만 아니라 잡음특성도 좋은 것으로 알려져 있다. 열선의 폭이 좁을수록 공간 분해능은 좋아지지만 대신 측정신호의 크기가 작아져 신호대 잡음비가 낮아지게 된다. 열선에 750 mA의 전류를 흘릴 때 복사 온도계로 측정된 온도는 약 1400 K이었다. 가열된 열선에서 이온화된 세슘원자들은 컬렉터(collector)에 의해서 이온전류를 만들게 되고, 이 전류를 미소전류계(picoammeter: Keithley model 486)로써 측정함으로써 원자의 개수에 비례하는 신호를 얻게 된다. 이 열선은 최대 이동거리가 40 mm인 마이크로미터가 부착된 진공 피드스루를 통하여 미세하게 움직일 수 있도록 하였다.

IV. 결과 및 토론

냉각용 레이저의 주파수 편이에 따른 원자빔의 집속 효과를 알아보기 위하여 그림 2의 실험장치에서 냉각용 레이저의 주파수를 연속적으로 바꿀 때 열선 검출기로 원자빔의 플럭스(flux)를 측정하였다. 이 때 열선 검출기는 냉각용 레이저가 비춰지지 않은 상태에서 플럭스가 최대가 되는 지점에 고정하였다.

그림 4의 (a)는 냉각용 레이저의 주파수를 모니터 하기 위하여 관측한 포화흡수분광신호이고, (b)와 (c)는 열선 검출기에서 측정된 신호의 크기이다. 단, (b)와 (c)는 각각 $F=3 \rightarrow F'=4$ 의 리펄핑 레이저가 가해지지 않을 때와 가해질 때 얻은 것이다. 이 그림에서 냉각용 레이저의 주파수가 $F=4 \rightarrow F'=5$ 전이선 부근에 있을 때 신호 크기에 가장 큰 변화가 있다는 것을 알 수 있다. 특히, 전이선의 중심 주파수보다 낮은 쪽에서는 열선 검출기에서 나오는 신호가 증가하지만, 중심주파수보다 높은 쪽에서는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 적색 편이된(red-detuned) 레이저를 사용할 때는 원자가 집속되어 원자의 플럭스가 증가하지만, 청색 편이된 레이저를 사용하면 원자는 오히려 발산하여 원자의 플럭스가 감소한다는 것을 의미한다. 그리고 레이저 주파수의 디튜닝이 약 3 MHz 만큼 적색편이될 때 집속효과가 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 이것은 도플러 냉각이론에서 자연선폭($=5.2$ MHz)의 절반만큼 적색편이 시킬 때 냉각효과가 가장 크다는 예측과 거의 일치하는 결과이다.

리펄핑 레이저가 가해지는 경우 신호의 크기는 두 배 이상 증가하였다. 그 이유는 냉각되기 전 세슘원자 바닥상태의 $F=4$ 와 $F=3$ 에 있는 원자개수는 거의 동일하므로 만약 리펄핑 레이저가 가해지지 않는 경우 바닥상태 $F=4$ 에 있는 원자들만 냉각이 된다. 반면, 리펄핑 레이저가 가해지면 바닥상태 $F=3$ 에 있는 원자들도 바닥상태 $F=4$ 로 이동되므로 거의 모든 원자들이 냉각되기 때문이다.

그런데, $F=4 \rightarrow F'=4$ 전이선 부근에서 열선 검출기의 신호를 보면, 리펄핑 레이저가 없는 경우에는 신호가 전혀 나타나지

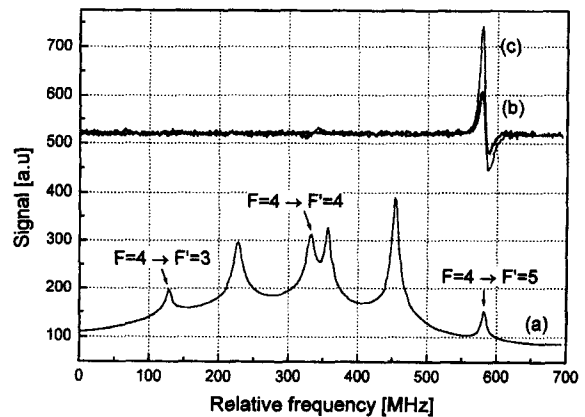


그림 4. 냉각용 레이저의 주파수(디튜닝)에 따른 원자빔의 플럭스 변화. (a) 냉각용 레이저 주파수를 모니터하기 위한 포화흡수신호, (b) 리펄핑 레이저가 없을 때, (c) 리펄핑 레이저가 가해질 때.

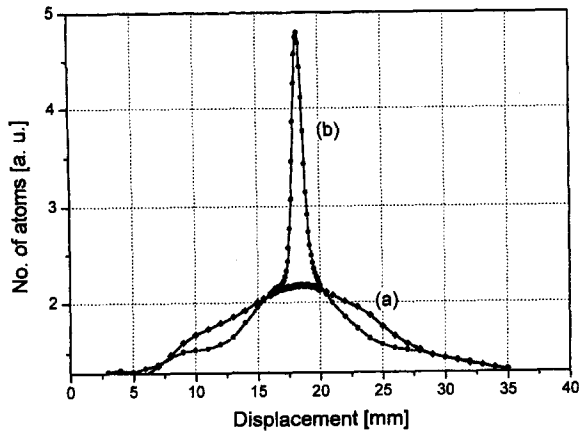


그림 5. 열선 검출기를 움직이면서 측정된 원자빔의 공간분포. (a) 냉각용 레이저가 가해지지 않을 때, (b) 냉각용 레이저가 가해질 때.

않지만, 리펄핑 레이저(주파수 편이 없음)가 가해지면 신호가 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 이 경우에는 $F=4 \rightarrow F=4$ 전이선의 중심주파수 보다 청색 편이(약 8 MHz)될 때 원자빔은 집속되고, 적색편이(약 8 MHz)될 때는 발산된다는 것을 알 수 있다. 이 현상은 냉각용 레이저와 리펄핑 레이저가 결합하여 시지프스 타입의 냉각^[23] 또는 편광 구배력(PGC)에 도움을 받는 VSCPT(Polarization gradient assisted velocity selective coherence trapping) 현상^[24]에 의한 것으로 추측되는데 이에 관한 더 자세한 연구가 필요하다.

그림 5는 냉각용 레이저의 위치로부터 1052 mm 떨어진 곳에서 열선 검출기를 설치하고, 마이크로미터로써 열선의 위치를 이동하면서 측정된 원자빔의 횡방향 공간분포이다. 그림 5(a)는 냉각용 레이저가 가해지지 않는 경우이고, (b)는 가해지는 경우로서 레이저의 주파수가 중심주파수에서 약 3 MHz 적색편이 되어있을 때 얻은 결과이다.

이 실험에 앞서, 냉각된 원자빔의 횡방향 속도 성분을 구하기 위해 냉각용 레이저로부터 520 mm 떨어진 위치에서 동일한 실험을 수행하였다. 그 결과, 520 mm 위치에서 측정된 것보다 1052 mm에서 측정된 분포의 반치폭이 0.24 mm 넓었다. 이를 이용하여 계산한 결과, 횡방향 속도성분에 해당하는 원자의 온도는 약 $60 \mu\text{K}$ 이었다. 이것은 도플러 냉각의 한계온도($= 127 \mu\text{K}$) 보다 낮은 온도이다. 이에 관해서는 이광자 냉각 이론^[11,12]에 의해 이미 설명되었다.

냉각용 레이저의 세기가 입사할 때와 되반사 될 때 서로 차이가 나는 경우에 원자빔의 공간적 분포를 측정된 결과가 그림 6에 나와있다. 그림에서 백분율은 입사하는 레이저의 세기(약 4 mW)에 대한 되반사된 레이저의 세기를 나타낸다. 되반사 되는 레이저의 세기가 점점 약해지면 그 쪽의 광압이 줄어들어 원자빔은 점점 그 방향으로 치우치는 것을 알 수 있다. 이것은 그림 1(a)에서 설명한 것과 정성적으로 일치하는 결과이다.

원자빔이 횡방향 냉각되는 지점에 정자장을 가하면서 원자빔의 공간적인 분포를 측정된 결과가 그림 7이다. 헬름홀츠 코일을 이용하여 냉각용 레이저의 진행방향과 서로 수직인 두 방향에서의 지자장은 상쇄시키고 진행방향과 같은 방향으로는

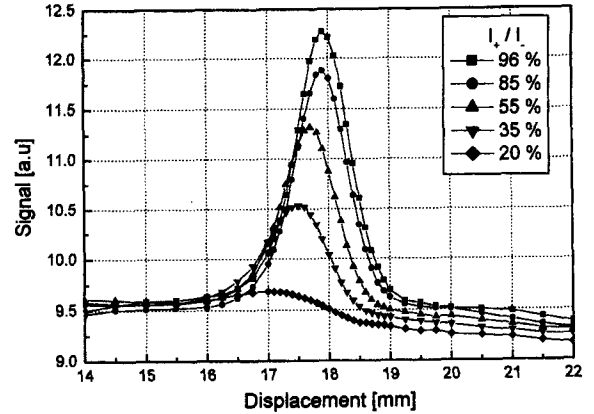


그림 6. 냉각용 레이저의 한쪽광의 세기(I_r)가 다른쪽 광의 세기(I_s)와 다를 때 측정된 원자빔의 공간적 분포.

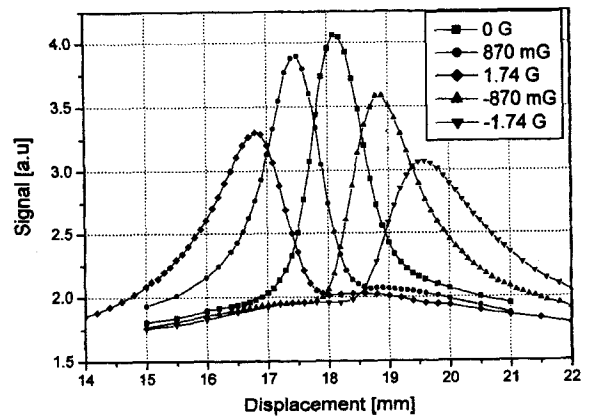


그림 7. 냉각용 레이저광의 진행방향으로 정자장을 가하면서 측정된 원자빔의 공간분포(단, - 부호는 자장의 방향이 반대임을 나타냄).

자기장의 세기를 바꾸면서 집속된 원자빔의 공간분포를 관찰하였다. 자장이 없는 경우에 비해 자장의 세기가 커질수록 집속된 원자빔의 위치가 좌우로 이동하는 것을 볼 수가 있다. 그림 1(b)에서 설명했듯이 원자는 제만 효과에 의해 자기 부준위가 이동한 만큼 두 레이저의 주파수를 서로 다르게 느끼게 되므로 원자가 받는 힘은 속도가 0이 아닌 곳으로 이동한다. 즉, 속도 선택적으로 원자는 냉각 및 집속^[19]이 이루어지게 된다. 이와 같은 방법을 이용하면 원자빔을 집속함과 동시에 한정된 각도 이내에서 굴절시키는 것이 가능하다.

V. 결 론

서로 반대 방향으로 진행하는 σ^+ 와 σ^- 원편광 레이저를 이용하여 세습 열원자빔을 직경 약 30 mm에서 1 mm 이하로 집속하였다. 출력 5 mW이고 크기가 $1.5 \times 0.5 \text{ cm}$ 인 레이저광을 사용하여 1차원 횡방향 냉각을 하였다. 이때 레이저의 주파수가 3 MHz 적색편이 되어 있는 경우 집속이 가장 잘 되는 것을 관찰하였다.

그리고 서로 반대 방향으로 진행하는 냉각용 레이저의 세기가 다른 경우와 정자장을 가하는 경우에 집속된 원자빔의 공

간적 분포를 관찰하였는데, 그 결과는 도플러 냉각이론으로 계산한 결과와 정성적으로 일치한다는 것을 알았다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 국가지정연구실(NRL) 사업에서 일부 연구비 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] S. Chu, L. Hollberg, J. Bjorkholm, A. Cable, and A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48 (1985).
 [2] M. A. Kasevich, E. Riis, and S. Chu, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 612 (1989).
 [3] P. Pillet, C. Valentin, R.-L. Yuan, and J. Yu, *Phys. Rev. A* **48**, 845 (1993).
 [4] K. Gibble and S. Chu, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1771 (1993).
 [5] G. Timp, R. E. Behringer, D. M. Tennant, and J. E. Cunningham, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1636 (1992).
 [6] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
 [7] M.-O. Mewes, M. R. Andrews, D. M. Kurn, D. S. Durfee, C. G. Townsend, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 582 (1997).
 [8] V. Letokhov, V. Minogin, and B. Pavlik, *Sov. Phys. JETP* **45**, 698 (1977).
 [9] P. D. Lett, R. N. Watts, C. I. Westbrook, and W. D. Phillips, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 169 (1988).
 [10] J. Dalibard and C. Cohen-Tannoudji, *J. Opt. Soc. Am. B* **6**, 2023 (1989).

[11] Soo Chang, Taeg Young Kwon, Ho Seong Lee, and V. G. Minogin, *Phys. Rev. A* **60**, 2308 (1999).
 [12] Soo Chang, Taeg Young Kwon, Ho Seong Lee, and V. G. Minogin, *Phys. Rev. A* **60**, 3148 (1999).
 [13] V. I. Balykin, V. S. Letokhov, V. G. Minogin, Yu. V. Rozhdestvensky, and A. I. Sidorov, *J. Opt. Soc. Am. B* **2**, 1776 (1985).
 [14] A. Aspect, N. Vansteenkiste, R. Kaiser, H. Haberland, M. Karrais, *Chem. Phys.* **145**, 307 (1990).
 [15] A. Aspect, J. Dalibard, A. Heidmann, C. Salomon, and C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1688 (1986).
 [16] B. Sheehy, S.-Q. Shang, P. van der Straten, S. Hatamian, and H. Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 858 (1990).
 [17] A. Aspect, E. Arimondo, R. Kaiser, N. Vansteenkiste, and C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 7 (1988).
 [18] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 1321 (1970).
 [19] S.-Q. Shang, B. Sheehy, H. Metcalf, P. van der Straten, and G. Nienhuis, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 1094 (1991).
 [20] P. D. Lett, W. D. Phillips, S. L. Rolston, C. E. Tanner, R. N. Watts, and C. I. Westbrook, *J. Opt. Soc. Am. B* **6**, 2084 (1989).
 [21] Ho Seong Lee, Sang Eon Park, Jong Dae Park, and Hyuck Cho, *J. Opt. Soc. Am. B* **11**, 558 (1994).
 [22] D. Bassi *et al.*, *Atomic and Molecular Beam Methods*, Oxford University Press, 1988.
 [23] R. Gupta, C. Xie, S. Padua, H. Batelaan, and H. Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 1094 (1991).
 [24] M. S. Shahriar, P. R. Hemmer, M. G. Prentiss, P. Marte, J. Mervis, D. P. Katz, N. P. Bigelow, and T. Cai, *Phys. Rev. A* **48**, R4035 (1993).

Collimation of cesium atomic beam using laser light pressure

Sang Eon Park and Hyuck Cho

Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Taeg Yong Kwon, Sung Hoon Yang, and Ho Seong Lee

Time and Frequency Lab., Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea

(Received May 2, 2000, Revised manuscript received June 20, 2000)

Thermal cesium atomic beam was collimated by transversely cooling of atoms, for which circularly polarized (σ^+ and σ^- polarized) laser light was illuminated to the atomic beam from two perpendicular directions. As a result, the temperature corresponding to the transverse velocity component could be decreased from 430 mK to 60 μ K. In addition, the spatial atomic distribution was observed according to the power difference of the two laser beams and the magnetic field applied, and the result was qualitatively coincided with the calculation result by the Doppler cooling theory.

OCIS codes : 140.7010, 190.4180, 020.0020.