

결합광 세기에 따른 Rb 원자의 사다리형 전자기 유도 투과

문한섭†

한국표준과학연구원 광기술표준부
Ⓣ 305-340 대전시 유성구 도룡동 1번지

이림 · 김종복

한국고원대학교 물리교육과
Ⓣ 363-791 충북 청원군 강내면 다락리

(2004년 8월 26일 받음, 2005년 1월 31일 수정본 받음)

우리는 Rb 원자의 $5S_{1/2}-5P_{3/2}-5D_{3/2}$ 전이선에서 조사광과 결합광의 편광조합 그리고 결합광 세기에 따른 사다리형 전자기 유도 투과 (EIT) 현상을 조사하였다. 우리는 $5D_{3/2}$ 전이선에서 초미세구조를 가진 사다리형 EIT 스펙트럼을 얻었고, EIT 스펙트럼의 최소 선폭은 6.5 MHz로 측정되었다. 우리는 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 레이저의 편광조합 뿐만 아니라 결합광의 세기에 따라서 변하는 것을 실험적으로 관측하였고, 결합광의 세기에 따라 신호의 크기가 달라지는 이유는 광의 세기에 대하여 원자계가 비선형적으로 상호작용하기 때문이라는 사실을 밝혔다.

주제어 : Rb, atomic coherence, EIT, polarization, coupling intensity, hyperfine structure.

I. 서 론

전자기 유도 투과(electromagnetically induced transparency ; EIT)^[1-9]는 원자의 공명 진동수를 갖는 조사광이 원자 매질을 통과할 때 강한 결합광에 의하여 매질에 흡수되지 않고 투과하는 양자 간섭 효과로써 원자결맞음 상호작용의 가장 대표적인 현상 중의 하나이다. Bollor 등이 고출력 펄스 레이저를 이용하여 스트론튬 증기에서 EIT 신호를 처음으로 관측한^[2] 이후 여러 종류의 원자 증기^[3,4], 원자 빔^[5], 고체^[6], 냉각된 원자^[7], 그리고 BEC(Bose Einstein condensate)^[8,9] 상태에서 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 최근에는 EIT 현상을 이용한 광정보 저장, 광통신 스위치 개발 및 초정밀 자계 개발 등에 활발하게 응용되고 있다.^[4-6]

대부분의 EIT에 대한 연구는 Λ 형, V형, 그리고 사다리형(ladder)형과 같은 3준위 원자계를 바탕으로 진행되고 있다.^[10] 본 연구에서 관심을 가지고 있는 사다리형 EIT는 Λ 형과 V형 EIT 구도와 다른 특징을 가지고 있다. 첫째, 도플러 확대된 원자계의 사다리형 EIT에서 다른 속도성분을 가진 원자들이 이광자 공진조건을 만족하기 위해서는 조사광과 결합광이 서로 반대방향으로 진행하는 정렬을 한다. 둘째, 사다리형 EIT 스펙트럼에는 그림 1에서 보는 것과 같이 여기준위의 초미세준위는 좁은 에너지 간격을 가지고 있다. 이러한 원자 에너지 구조적인 특성 때문에 여기준위의 초미세구조가 나타난다. 언급된 두 가지 특징은 사다리형 구조에서 조사광과 결합광의 편광조합에 따른 EIT 초미세구조에 대한

연구를 가능하게 했다.^[11]

EIT 신호의 크기는 자발방출률, 결합광의 라비진동수, 그리고 레이저의 선폭과 밀접한 관련이 있다.^[12] 사다리형 EIT에서 초미세구조의 편광의존성은 편광조합에 따라서 각 전이선의 자기부준위 사이에서 상호작용하는 구도가 달라지고 이에 따른 상대적인 전이율이 바뀐에 따라서 전기 쌍극자 모멘트가 변하기 때문에 라비진동수의 변화가 나타나는 것이다. 그러므로 EIT 초미세구조의 편광의존성은 이광자 전이율을 이용하여 간단히 설명할 수 있다.^[11] 결합광의 라비진동수는 전기 쌍극자 모멘트와 전기장의 곱으로 표현된다. 그러므로 EIT 신호의 크기는 레이저의 편광 뿐만 아니라 결합광의 세기에 큰 영향을 받는다. 그러나, 결합광 세기에 따른 효과는 단지 EIT 신호에서 전체적인 크기에만 영향을 줄 것으로 예상되기 때문에 지금까지 결합광의 세기에 따른 EIT 초미세구조의 변화에 대한 연구는 없었다.

본 연구에서는 Rb 원자의 $5S_{1/2}-5P_{3/2}-5D_{3/2}$ 전이선을 이용하여 결합광과 조사광의 편광조합과 결합광의 세기에 따른 EIT 초미세구조를 조사하였다. 우리는 결합광과 조사광의 편광에 따른 EIT 스펙트럼을 측정하고, 이광자 전이율을 고려한 계산 결과와 비교하였다. 그리고, 결합광의 세기에 따른 EIT 초미세구조 스펙트럼을 얻고, EIT 초미세구조의 상대적인 크기를 조사하였다.

II. 실험장치

본 연구에서는 Rb 원자의 $5S_{1/2}-5P_{3/2}-5D_{3/2}$ 전이선을 이용하여 그림 1과 같은 전형적인 사다리형 원자계에서 실험을

† E-mail: hsmoon@kriss.re.kr

수행하였다. 실제 원자계는 그림 1과 같이 핵 스핀에 의한 초미세준위와 자기부준위가 존재하기 때문에 복잡한 에너지 구조를 가지고 있지만, 사다리형 EIT는 간단한 3준위 원자계를 이용하여 물리적으로 이해할 수 있다.

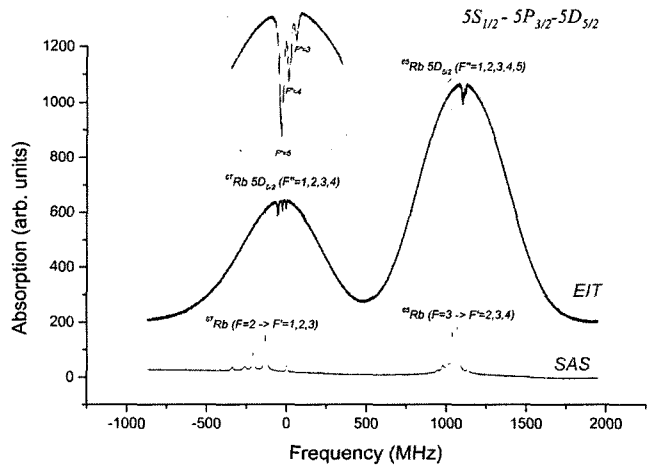
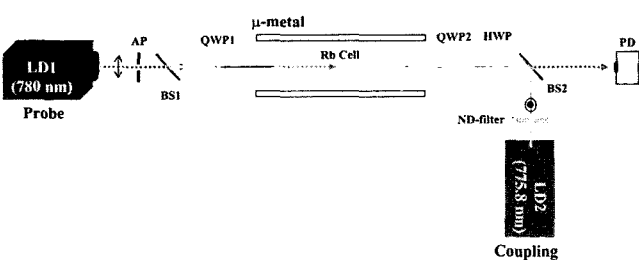
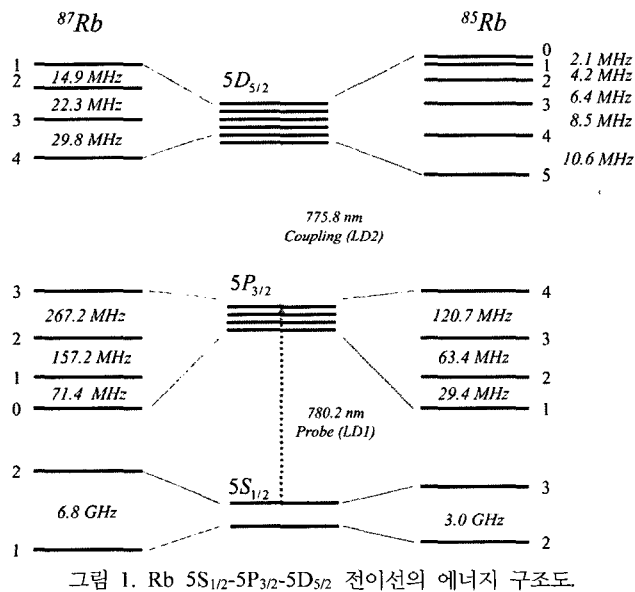
Rb원자의 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ - $5D_{5/2}$ 전이선에서 사다리형 EIT 스펙트럼을 얻기 위해서 우리는 그림 2와 같은 실험장치를 구성하였다. 실험에 사용한 레이저는 외부공진형 반도체 레이저로서 선폭은 약 1.5 MHz이고, 조사광과 결합광의 파장은 각각 780.2 nm와 775.8 nm이다. 조사광의 주파수는 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ 전이선 근처를 주사하였고, 레이저의 주파수를 확인하기 위해서 포화흡수분광신호를 이용하였다. 결합광의 주파수는 $5P_{3/2}$ - $5D_{5/2}$ 전이선 근처에서 자유발전 상태로 동작되었다. 그리고 조사광과 결합광의 직경은 약 2 mm 였다. 두 레이저 빔은 서로 반대 방향으로 진행하고, Rb원자 증기셀에서 겹쳐지게 정렬되었다. 실험에 사용한 Rb원자 증기셀은 직경 25 mm 길이 100 mm의 원통형이고, 약 23°C의 상온으로 유지되도록 하였다. 외부 자기장은 미세하게 분리된 자기부준위들에 의해서 EIT 스펙트럼의 선폭을 넓게 만드는 효과를 줄 수 있고 스펙트럼의 상대적인 크기에 변화를 주기 때문에 외부 자기장을 차단하기 위해서 μ -metal을 사용하였다. μ -metal 내부에 잔

여 자기장은 수 mGauss 정도로 측정되었다. 본 실험에서는 조사광과 결합광의 다양한 편광조합에 따른 EIT 스펙트럼의 변화를 조사하기 위해서 $\lambda/2$ 와 $\lambda/4$ 위상지연기를 이용하였고, 결합광의 세기에 따른 스펙트럼의 변화를 조사하기 위해서 필터(ND-filter)를 이용하여 결합광의 세기를 조절하였다.

III. 실험결과 및 토의

그림 3은 ^{85}Rb 와 ^{87}Rb 원자의 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ - $5D_{5/2}$ 전이선에서 얻은 전형적인 사다리형 EIT 스펙트럼이다. 조사광의 주파수는 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ 전이선 근처에서 약 3 GHz로 주사되었고, 이 때 조사광과 결합광의 세기는 각각 약 0.5 mW/cm^2 와 7.5 mW/cm^2 이었다. 그림 3에서 알 수 있는 것처럼 사다리형 EIT 스펙트럼은 Λ 형과 V형의 EIT 스펙트럼과 달리 광편평에 의한 도플러 배경 스펙트럼의 변형이 없다는 특징이 있다. 이것은 조사광의 세기가 약하기 때문에 광편평에 의한 밀도변화가 거의 없다는 것을 의미한다. 그리고 사다리형 EIT 스펙트럼에서 초미세구조의 분리를 관측할 수 있는데, 이것은 여기준위($5D_{5/2}$)의 초미세준위에 의해서 나타나는 것이다. 사다리형 EIT 스펙트럼에서 초미세구조의 분리를 관측되는 이유는 그림 1에서 알 수 있는 것처럼 여기준위($5D_{5/2}$)의 초미세준위 간격이 약 2 MHz~30 MHz로 도플러 선폭 약 500 MHz와 비교해서 좁고 여기준위($5D_{5/2}$)의 초미세준위들이 도플러 선폭 내에 있기 때문이다.

^{85}Rb 의 경우는 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 여기준위($5D_{5/2}$)의 초미세준위 간격들이 10.6 MHz이하로 ^{87}Rb 의 다른 초미세준위의 에너지 간격보다 좁다. 이렇게 좁은 에너지 간격을 가지기 때문에 Rb 원자를 이용한 사다리형 EIT 스펙트럼에서는 지금까지 EIT 초미세구조를 명확하게 구별할 수 없었다.^[11-13] 그러나, 본 연구에서는 그림 3의 원 속에 있는 스펙트럼과 같이 ^{85}Rb 의 $5D_{5/2}$ 전이선의 EIT 초미세구조를 관측할 수 있



있다. 측정된 최소 EIT 스펙트럼의 선폭은 약 6.5 MHz이었고, 이것은 우리가 알기로 지금까지 Rb 원자의 사다리형 EIT에서 가장 좁은 스펙트럼이다.^[11-13] 이와 같이 좁은 선폭을 가진 EIT 스펙트럼을 얻을 수 있었던 것은 결합광과 조사광의 출력이 낮은 상태에서 EIT 스펙트럼을 측정했기 때문에 출력 선평넓어짐을 줄였고, 렌즈로 레이저광을 집광하지 않았기 때문에 지나가는 시간 넓어짐(Transient time broadening)을 줄일 수 있었고, 그리고 외부자기장 차폐효과로 자기부준위의 미세한 분리효과를 줄일 수 있었기 때문으로 분석된다.

사다리형 EIT 있어서 조사광과 결합광의 편광조합에 따라 자기부준위 사이의 상호작용 구도와 전이율은 달라진다. 그림 4(a)는 ⁸⁷Rb 원자의 5S_{1/2}(F=2)-5P_{3/2}(F'=1,2,3)-5D_{5/2}(F''=2,3,4) 전이선에서 조사광과 결합광의 편광조합에 따른 사다리형 EIT 스펙트럼이다. 조사광의 편광은 선편광(π)과 우원편광(σ^+)의 조합을 사용하였고, 결합광의 편광 조합은 두 개의 수직인 선편광(π 와 σ^+)과 두 개의 원편광(σ^+ 와 σ^-)을 이용하였다. 이 때 조사광과 결합광의 세기는 각각 약 1.1 mW/cm²와 11.3 mW/cm²이었다. 그림 4(a)에서 조사광과 결합광의 편광조합에 따라서 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 변하는 것을 관측할 수 있다.

조사광과 결합광의 편광조합에 따른 EIT 초미세구조의 상대적인 크기 변화를 이론적으로 설명하기 위해서는 그림 1과 같은 Rb 원자의 모든 초미세준위와 자기부준위들 사이의 원자결맞음을 고려해야 하지만, 모든 전이선의 원자결맞음을 고려한 이론적인 접근은 매우 복잡하다. 한편, McGloin *et al*은 이광자 전이율을 이용하여 사다리형 EIT 초미세구조의 편광의존성을 정성적으로 설명했었고^[11], 본 연구에서는 이광자 전이율을 이용한 계산결과와 실험결과를 비교하였다.

그림 4(b)는 도플러 확대된 원자계에서 얻어진 실험결과와 비교하기 위해서 이광자 전이율의 계산결과에 도플러 배경을 합하는 방법으로 얻은 것이다. 그림 4(a)와 (b)를 비교해보면, 실험결과와 이광자 전이율을 이용한 계산결과는 편광조합에 따른 EIT 초미세구조의 변화를 잘 설명하고 있다. 그러나, 실험결과와 계산결과 사이에 약간의 차이는 원자결맞음 효과를 고려하지 않은 이광자 전이율 계산의 한계와 레이저의 편광 정확성과 같은 실험적인 문제 등에서 원인을 찾을 수 있다.

이광자 전이율만을 고려하면, 사다리형 EIT에서 초미세구조의 상대적인 크기는 조사광과 결합광의 편광에 따라서 전이율이 결정되기 때문에 결합광의 세기가 달라지더라도 초미세구조의 상대적인 크기에는 변화가 없을 것으로 예상된다. 그러나, 우리는 ⁸⁷Rb 원자의 5S_{1/2}(F=2)-5P_{3/2}(F'=1,2,3)-5D_{5/2}(F''=2,3,4) 전이선에서 결합광의 세기에 따른 EIT 초미세구조의 변화를 조사하였다. 그림 5는 그림 4에서 조사광과 결합광의 편광이 모두 우원편광(σ^+)인 조건에서 결합광의 세기를 달리하면서 얻은 EIT 스펙트럼이다. 이 때 조사광의 세기는 약 1.1 mW/cm²이었다. 본 논문에서 그림 5의 조건을 제시하는 이유는 다른 조건의 스펙트럼과 비교해서 스펙트럼이 간단하여 5D_{5/2}(F''=3)과 5D_{5/2}(F''=4) 두 신호의 상대적인 EIT 크기의 변화를 쉽게 조사할 수 있기 때문이다. 그리고 다른 조건의 스펙트럼에서도 그림 5와 같이 결합광의 세기 따라서 EIT 초미세구조의 변화를 관측할 수 있었다.

그림 5에서 초미세구조 5D_{5/2}(F''=3)과 5D_{5/2}(F''=4)의 상대적인 크기를 비교해보면, 결합광의 세기에 따라서 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 변하고 있음을 관측된 스펙트럼을 통해서 확인할 수 있다. 그림 6(a)는 결합광의 세기에 따른 두 신호의 상대적인 크기를 분석하기 위해서 그림 5의 스펙

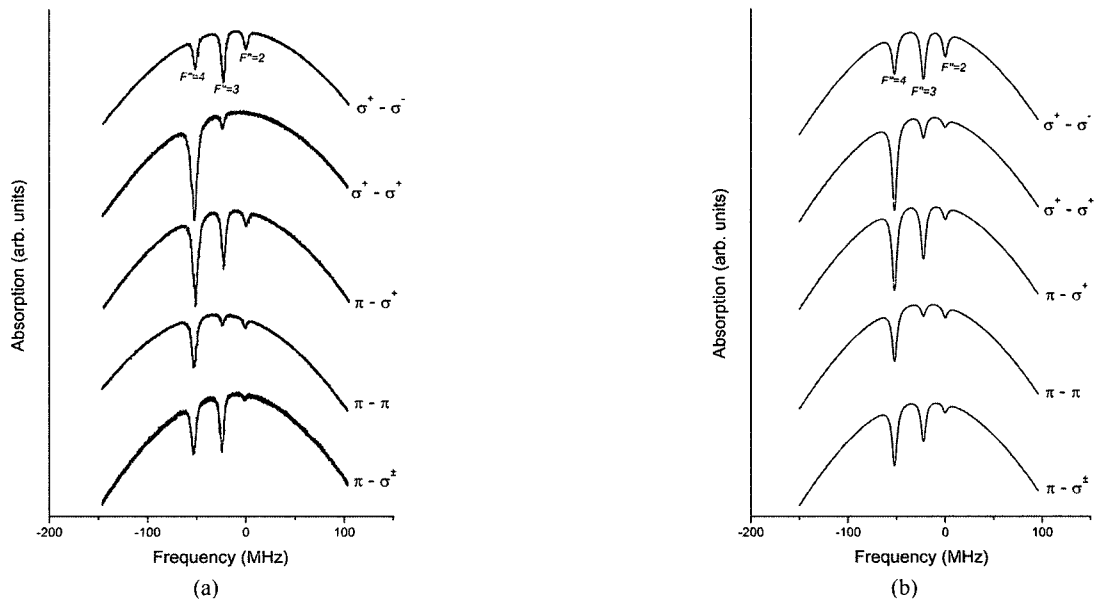


그림 4. (a) ⁸⁷Rb 원자의 5S_{1/2}(F=2)-5P_{3/2}(F'=1,2,3)-5D_{5/2}(F''=2,3,4) 전이선에서 조사광과 결합광의 편광에 따른 EIT 스펙트럼, (b) 이광자 전이율을 이용하여 계산된 스펙트럼.

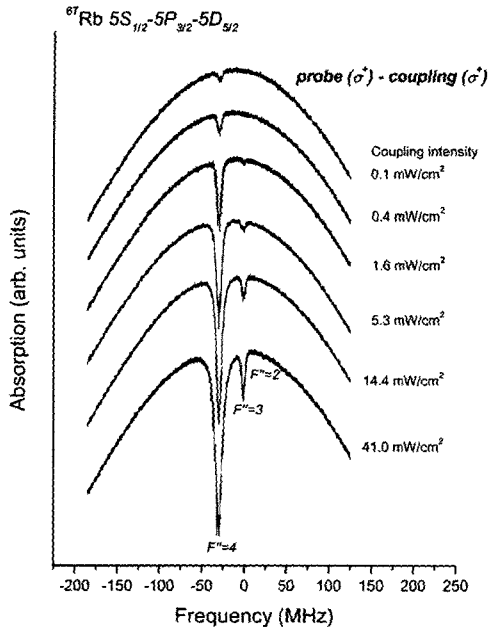
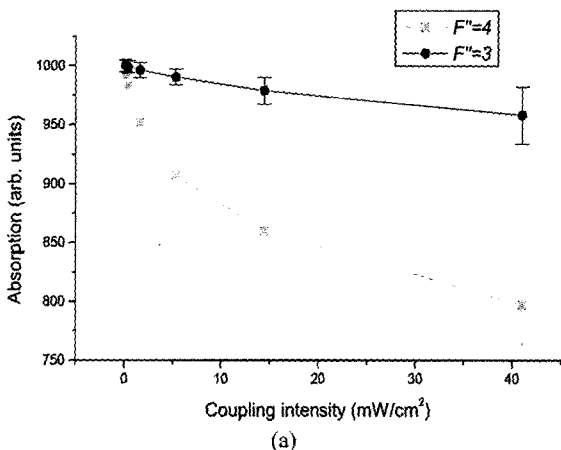
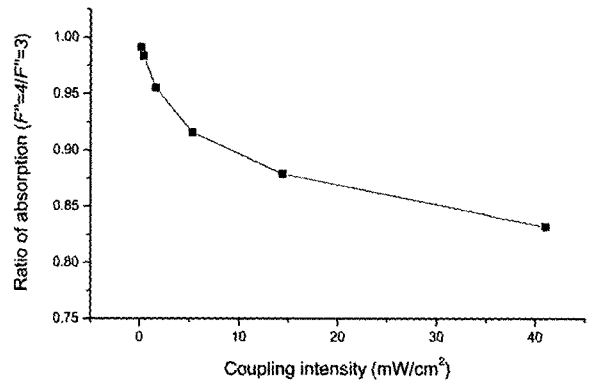


그림 5. 조사광(σ)-결합광(σ)을 이용한 ^{87}Rb 원자의 $5S_{1/2}(F=2)-5P_{3/2}(F=1,2,3)-5D_{5/2}(F=2,3,4)$ 전이선에서의 결합광의 세기에 따른 EIT 스펙트럼.

트럼으로부터 $5D_{5/2}(F=3)$ 과 $5D_{5/2}(F=4)$ 의 크기를 결합광의 세기에 대해서 나타난 것이다. 결합광의 세기가 0인 곳의 흡수는 선형흡수를 의미한다. 그림 6(a)에서 결합광의 세기가 증가함에 따라서 흡수는 비선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. EIT 초미세구조의 상대적인 크기를 분석하기 위해서 그림 6(a)의 결과를 각 결합광의 세기에 따라서 $5D_{5/2}(F=3)$ 의 흡수정도를 기준으로 $5D_{5/2}(F=4)$ 의 상대적인 흡수정도를 그림 6(b)로 표현하였다. 결합광의 세기와 무관하게 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 일정하게 유지되었다면, 두 신호의 상대적인 흡수정도는 선형성을 보였겠지만, 그림 6(b)의 결과는 결합광의 세기에 따라서 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 달라짐을 의미한다.



(a)



(b)

그림 6. (a) 결합광의 세기에 따른 $5D_{5/2}(F=3)$ 과 $5D_{5/2}(F=4)$ 의 EIT 흡수 크기, (b) 결합광의 세기에 따른 $5D_{5/2}(F=3)$ 과 $5D_{5/2}(F=4)$ 의 EIT 흡수비.

결합광의 세기에 따라서 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 변하는 현상은 이광자 전이율로는 설명할 수 없다. 본 연구에서는 3준위 원자계를 이용한 Gea-Banacloche *et. al.*^[12]의 결과를 이용하여 실험결과를 설명하였다. Gea-Banacloche *et. al.*은 도플러 선폭 확대된 간단한 3준위 원자계에서 EIT 현상을 이론적으로 계산하고 Rb 원자를 이용한 실험결과와 비교하였다. 비록 그들은 결합광이 센 조건에서 실험을 수행했기 때문에 EIT 스펙트럼에서 초미세구조는 분리를 관측하지는 못했지만, 결합광의 세기에 대한 EIT 신호의 크기를 측정할 수 있었다. 그리고, 유사한 다른 연구 결과에서도 EIT 신호의 크기는 결합광의 세기에 대해서 비선형적인 변화를 보인다는 것을 확인할 수 있다.^[14,15]

도플러 선폭 확대된 3준위 사다리형 원자계에서 약한 조사광을 사용하고 있고, 조사광과 결합광의 주파수가 같으면, 광이 물질에 입사했을 때 광에 의해서 유도되는 감수율은 다음과 같이 간단하게 표현되고,^[12]

$$\chi = \frac{4i\hbar c g_{12}^2 N_0 \sqrt{\pi}}{\epsilon_0 u \omega_p} e^{z^2} (1 - \text{erf}(z)) \quad (1)$$

여기서

$$z = \frac{c}{u \omega_p} \left(\gamma_{21} - i\Delta_1 + \frac{\Omega_c^2 / 4}{\gamma_{31} - i(\Delta_1 + \Delta_2)} \right) \quad (2)$$

이다. 식 (1)에서 x 는 감수율, g_{ij} 는 전기 쌍극자 모멘트, N_0 는 원자밀도, 그리고 $u/\sqrt{2}$ 는 원자속도의 제곱-평균-제곱근을 나타낸 것이다. 그리고 식 (2)에서 γ_{ij} 는 자발방출률, Δ_1 과 Δ_2 는 조사광과 결합광의 어긋남진동수(detuning), $\Omega_c \equiv 2g_{32}E_c$ 는 결합광의 라비진동수를 나타낸 것이다. 식 (1)의 허수부 즉 감수율의 허수부는 광이 물질 속을 진행해 갈 때 물질에 의해 흡수되는 정도를 의미하고 식 (1)로부터 원자결맞음 효과에 의한 투과정도를 예상할 수 있다. 결합광의 주파수가 $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ 전이선에 공명($\Delta_2=0$)할 때, EIT 현상은 조사광의 주파수가 이광자공명 조건을 만족하는 조건 $\Delta_1=0$ 에서 일어난

다. 그러므로 $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$ 인 조건에서 식 (2)의 독립변수 z 는

$$z_r = \frac{c}{u\omega_p} \left(\gamma_{21} + \frac{a^2 R}{\gamma_{31}} I \right) \quad (3)$$

와 같이 간단한 실수형태의 독립변수 z_r 로 표현된다. 여기서 a 는 Clebsch-Gordan 계수, I 는 결합광의 세기, 그리고 R 은 라비진동수와 레이저의 세기와의 관계에서 얻어지는 값으로 결합광의 주파수와 자발방출 시간에 의해서 결정되는 값이다. 특히, 식 (3)의 마지막 항은 결합광의 세기로 표현되어 있고, 이것은 결합광의 세기에 따른 EIT 신호가 식 (1)과 같이 비선형적으로 변한다는 것을 의미한다.

조사광과 결합광의 편광과 초미세준위가 결정되면 Clebsch-Gordan 계수가 결정되고, Clebsch-Gordan 계수가 다른 경우에 EIT 신호의 크기는 식 (1)과 식 (3)에 의해서 비선형성을 가짐으로 결합광의 세기에 따라서 EIT 신호의 상대적인 크기는 달라질 수 있다. 간단한 예를 들면, Clebsch-Gordan 계수의 제곱이 $a^2=0.2$ 와 $a^2=1.0$ 인 경우에 식 (1)에 식 (3)을 대입하여 계산하면, 그림 7(a)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 때

$\gamma_{21}=3.0$ MHz와 $\gamma_{31}=0.5$ MHz로 가정하였다. 우리는 그림 7 (a)로부터 EIT는 결합광의 세기에 대해서 비선형성을 가지고 있으며, Clebsch-Gordan 계수가 다른 경우에 결합광의 세기에 따라서 EIT 현상에 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 7(a)의 결과에서 Clebsch-Gordan 계수가 다른 두 경우에 결합광의 세기에 따른 흡수의 비 $\text{Im}\chi(z_r)_{a^2=1.0}/\text{Im}\chi(z_r)_{a^2=0.2}$ 를 계산해보면, 그림 7(b)와 같이 비선형적인 곡선을 얻을 수 있다. 이러한 결과로부터 결합광의 세기에 따른 EIT 초미세구조의 변화는 EIT 신호의 크기가 결합광의 세기에 대해서 비선형성을 가지기 때문에 나타나는 현상임을 알 수 있다.

IV. 결 론

우리는 Rb 원자를 이용하여 사다리형 EIT 현상에 대한 편광과 결합광의 세기에 따른 사다리형 EIT의 초미세구조를 조사하였다. 우리는 $5S_{1/2}-5P_{3/2}-5D_{5/2}$ 전이선에서 사다리형 EIT 스펙트럼에서 초미세구조 관측하였고, 이 때 측정된 스펙트럼의 선폭은 약 6.5 MHz이었다. 우리는 조사광과 결합광의 편광조합에 따른 EIT 초미세구조의 변화를 관측하고, 실험결과가 이광자 전이율로 계산된 결과와 일치됨을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 레이저의 편광에 따라서 자기부준위 사이에서의 전이율이 달라지고, 이러한 효과로 사다리형 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 달라지기 때문이다.

특히, 본 연구에서는 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 결합광과 조사광의 편광조합뿐만 아니라 결합광의 세기에 따라서 달라질 수 있음을 실험으로 보였다. 우리는 ^{87}Rb 원자의 $5S_{1/2}(F=2)-5P_{3/2}(F'=1,2,3)-5D_{5/2}(F''=2,3,4)$ 전이선에서 결합광의 세기에 따른 EIT 스펙트럼을 얻었고, 결합광의 세기에 따라서 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 변하는 것으로 확인했다. 이와 같은 실험결과를 설명하기 위해서 우리는 도플러 확대된 3준위 원자계에서 결합광의 세기에 따른 EIT 크기를 계산했다. 계산 결과로부터 우리는 결합광의 세기와 EIT 크기의 관계는 비선형성을 가지고 있다는 것으로 확인할 수 있었다. 이러한 비선형성으로부터 결합광의 세기에 따른 사다리형 EIT 초미세구조의 상대적인 크기가 변하는 현상을 설명할 수 있었다.

참고문헌

- [1] S. E. Harris, "Electromagnetically induced transparency", *Phys. Today*, vol. 50, no. 7, pp. 36-42, 1997.
- [2] K. J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, "Observation of electromagnetically induced transparency", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 66, no. 1, pp. 2593-2596, 1991.
- [3] M. Xiao, Y. Li, S. Jin, and J. Gea-Banacloche, "Measurement of dispersive properties of electromagnetically induced transparency in rubidium atoms", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, pp. 666-669, 1995.
- [4] H. S. Moon, H. A. Kim, B. S. Kim, and J. B. Kim,

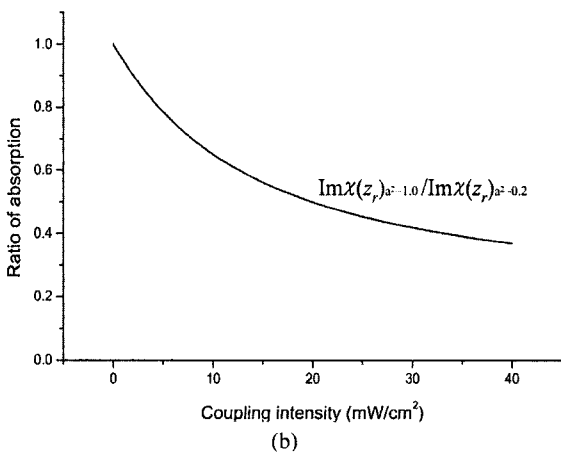
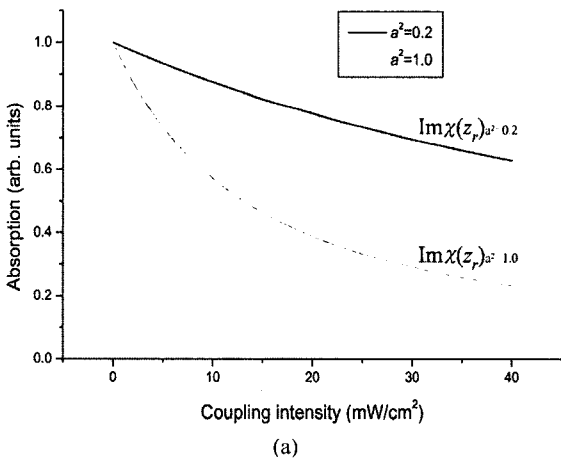


그림 7. (a) 사다리형 3준위 원자계에서 결합광의 세기에 따른 EIT 흡수 정도 계산($a^2=0.2$, $a^2=1.0$), (b) 결합광의 세기에 따른 흡수의 비($\text{Im}\chi(z_r)_{a^2=1.0}/\text{Im}\chi(z_r)_{a^2=0.2}$).

- “Electromagnetically induced transparency in an ideal three level system in 87Rb atoms”, *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 35, no. 3, pp. 207-211, 1999.
- [5] G. G. Padmabandu, G. R. Welch, I. N. Shubin, E. S. Fry, D. E. Nikonov, M. D. Lukin, and M. O. Scully, “Laser oscillation without population inversion in a sodium atomic beam”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, pp. 2053-2056, 1996.
- [6] B. S. Ham, S. M. Shahriar, and P. R. Hemmer, “Electromagnetically induced transparency over spectral hole-burning temperature in a rare-earthdoped solid”, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 16, no. 5, pp. 801-804, 1999.
- [7] S. A. Hopkins, E. Usadi, H. X. Chen, and A. V. Durrant, “Electromagnetically induced transparency of laser-cooled rubidium atoms in three-level Λ -type systems”, *Opt. Commun.*, vol. 138, pp. 185-192, 1997.
- [8] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, “Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas”, *Nature(London)*, vol. 397, pp. 594-598, 1999.
- [9] S. E. Harris and L. V. Hau, “Nonlinear optics at low light levels”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, pp. 4611-4614, 1999.
- [10] David J. Fulton, Sara Shepherd, Richard R. Moseley, Bruce D. Sinclair, and Malcolm H. Dunn, “Continuous-wave electromagnetically induced transparency: A comparison of V, Lambda, and cascade systems”, *Phys. Rev. A*, vol. 52, no. 3, pp. 2302-2311, 1995.
- [11] D. McGloin, M. H. Dunn, and D. J. Fulton, “Polarization effects in electromagnetically induced transparency”, *Phys. Rev. A*, vol. 62, pp. 053802-1 - 053802-6, 2000.
- [12] Julio Gea-Banacloche, Yong-qing Li, Shao-zheng Jin, and Min Xiao, “Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media: Theory and experiment”, *Phys. Rev. A*, vol. 51, no. 1, pp. 576-584, 1995.
- [13] S. D. Badger, I. G. Hughes, and C. S. Adams, “Hyperfine effects in electromagnetically induced transparency”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 34, pp. L749-L756, 2001.
- [14] Baolong Lu, W. H. Burkett, and Min Xiao, “Electromagnetically induced transparency with variable coupling-laser linewidth”, *Phys. Rev. A*, vol. 56, pp. 976-979 1997.
- [15] M. Stahler, R. Wynands, S. Knappe, J. Kitching, L. Hollberg, A. Taichenachev, and V. Yudin, “Coherent population trapping resonances in thermal 85Rb vapor: D1 versus D2 line excitation”, *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 16, pp. 1472 -1474, 2002.

Coupling Intensity Effects in Ladder-type Electromagnetically Induced Transparency of Rb atoms

H. S. Moon[†]

Division of Optical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

[†]E-mail: hsmoon@kriss.re.kr

L. Lee, and J. B. Kim

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Chung-buk, 363-791, Korea

(Received August 26, 2004, Revised manuscript January, 31, 2005)

We have studied the polarization effects and the coupling intensity effects of electromagnetically induced transparency(EIT) in the $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ - $5D_{5/2}$ ladder system of Rb. We obtained the EIT spectrum with the hyperfine structure of $5D_{5/2}$ transitions and the minimal width of the measured EIT spectrum was 6.5 MHz. We observed the change of the relative magnitudes of the hyperfine structure of EIT according to not only the polarizations of lasers but also the intensity of the coupling laser. The cause of the coupling intensity effects is that the EIT signal nonlinearly increases to the coupling intensity.

OCIS Codes : 020.1670, 020.2930, 300.6320.