

## 느린 빛

### Slow light

박규환

고려대학교 이과대학 물리학과

qpark@korea.ac.kr

빛의 속도는 매질의 굴절율에 반비례하여 변한다. 최근 인위적으로 굴절율을 아주 크게 하여 빛의 속도가 소리의 속도보다 느리게 하고 또 경우에 따라 아예 빛을 멈췄다가 다시 보내는 실험이 성공하여 큰 관심을 모은바 있다 [1]. 양자결맞음 현상의 하나인 Electromagnetically Induced Transparency(EIT)를 사용한 이 실험은 Bose-Einstein condensate 상태의 루비듐 기체에서 처음 이루어졌지만 최근 Pr doped Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> 결정을 이용한 고체 내에서 빛의 속도를 45m/s 로 낮춘 실험도 발표되었다 [2]. 빛의 초저속 제어는 빛의 acoustic mode와의 결합, 다중파 혼합 및 quantum nondemolition measurement, 단광자 비선형 광학, 광 메모리 및 광 연산등 다양한 분야에의 응용을 가능하게 할 것으로 기대되고 있다.

본 발표에선 앞서 소개한 EIT를 사용한 방법과는 전혀 다른 방법으로 빛의 속도를 제어하는 방법을 두가지 소개하고자 한다[3,4]. 첫째로 광 전송시 사용하는 광섬유 내에서 연속(cw) 레이저를 사용하여 광신호(광솔리톤)의 전송속도를 제어하는 방법을 제시하고 cw 레이저의 주파수 및 진폭조절을 통해 초저속 제어의 가능성을 보이고 둘째로 미세공진기(micro resonator)와 광도파로를 결합하여 chip 위에서 구현 가능한 광 분산 및 속도 제어장치에 대해 언급하고자 한다.

광섬유에서 광전송은 비선형 슈뢰딩거 방정식으로 기술된다. 이 방정식이 갖는 솔리톤 해는 그 안정성으로 인해 차세대 초고속 광통신의 기본 단위가 될 것으로 믿어지고 있다. 본 발표자는 엄밀한 수학적 유도를 통해 광 솔리톤과 cw 레이저 광이 동시에 존재하는 해를 구하였고 이를 통해 cw 레이저가 솔리톤에 미치는 영향을 분석한 바 있다 [3]. 특히 솔리톤의 전파속도를 나타내는 군속도는 cw 레이저의 진폭과 주파수에 의해 변하게 되는데 이를 활용하면 솔리톤의 속도 제어 및 신호의 buffering이 가능할 것으로 보인다. cw 레이저로 인한 솔리톤의 군속도 변화는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$V_{lab}(A_c) = \left[ \frac{1}{v_g} + \frac{\sqrt{-\beta_2 \gamma P} \operatorname{Re}[(w_s/A_s + i)] \sqrt{(1 - iw_s/A_s)^2 - 4(A_c/A_s)^2}}{2 \operatorname{Re}[\sqrt{(1 - iw_s/A_s)^2 - 4(A_c/A_s)^2}]} \right]^{-1}$$

여기서 P는 솔리톤의 peak power를 표시하고 A<sub>c</sub>/A<sub>s</sub>는 cw 진폭 대 솔리톤 최대진폭의 비를 나타내며 v<sub>g</sub>는 cw laser의 군속도를 표시한다. w<sub>s</sub>/A<sub>s</sub>는 솔리톤과 cw 사이의 frequency detuning 에 비례하는 양으로써 아래와 같다.

$$\frac{w_s}{A_s} = \sqrt{\frac{-\beta_2}{\gamma P}} \Delta w_{phys} = 2\pi \sqrt{\frac{-\beta_2}{\gamma P}} \Delta \nu$$

길이  $L$  인 광섬유를 지나는 솔리톤의 경우 군속도의 변화로 인해 발생하는 시간 지연을 표시하기 위해 다음과 같은 광섬유의 parameter 값을 사용하면

$$\beta_2 = -20.4 \text{ps}^2/\text{km}, \quad \gamma = 1.3 \text{W}^{-1} \text{km}^{-1}, \quad \lambda = 1.55 \mu\text{m}, \quad n_g = 1.46, \quad v_g = 1/\beta_1 = c/n_g = 2.05 \times 10^8 \text{m/s}$$

그림 1과 2에서 보는 것과 같은 특성곡선을 얻을 수 있다. 그림 1은 peak power 100 mw, 펄스 폭 13 ps 인 솔리톤에 frequency detuning이 각각 1, 2, 3 kHz 인 cw 레이저를 가한 경우 솔리톤의 속도변화를 cw 대 솔리톤의 진폭비로 그린 것이다. 그림에서 보듯이 솔리톤의 속도는 비의 값 0.5 를 기준으로 급격하게 감소하며 detuning 이작을 수록 더 급격하게 감소한다. 그림 2는 지연되는 시간을 detuning 1, 2, 3 GHz 의 경우에 대해 나타낸 것이다. kHz 단위의 detuning을 조절하기는 어렵지만 그림 2에서 처럼 GHz 단위의 detuning 의 시간지연이 ps 단위인 점에 비추어 directional coupler 와 time correlation 을 사용할 경우 솔리톤 군속도 변화는 실험적으로 관측이 가능할 것으로 보이며 현재 실험이 진행중이다.

cw 레이저를 사용한 솔리톤의 군속도 제어는 all optical control이란 점에서 매력이 있는 반면 microresonator를 활용한 방식은 소형화가 가능하여 chip 위에서 구현이 가능할 것으로 보인다. 본 발표에선 그림 3에서 보듯이 microdisk와 같은 미세 공진기들을 광도파로 옆에 side couple 시키는 경우 광도파로의 광전파 특성, 특히 분산 및 비 선형성, 군속도의 변화에 대해 설명하고 광소자로서의 가능성에 대해 언급하고자 한다.

- [1] L.V. Hau et al., Nature, 397 (1999) 594; C. Liu et al., Nature 409 (2001) 490.
- [2] A.V. Turukhin et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 023602
- [3] Q.H. Park and H.J. Shin, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 4432.
- [4] J. Heebner, Q.H. Park. R. Boyd, JOSA B to appear

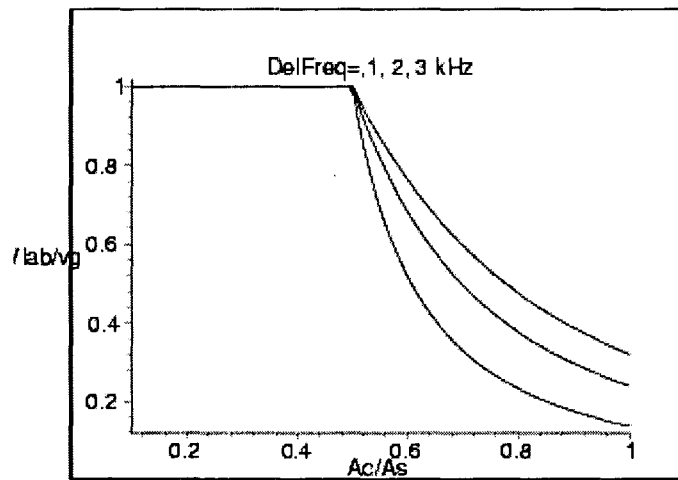


그림 1

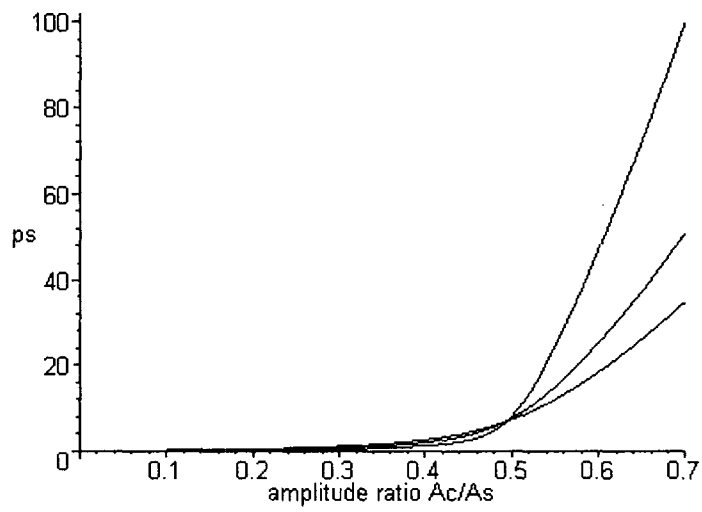


그림 2



그림 3