광섬유 내 비선형 광학 현상을 이용한 광속 제어

Slow and fast light in optical fibers based on nonlinear optical phenomena

송광용

중앙대학교 물리학과

songky@cau.ac.kr

광속 제어와 그 응용에 관한 연구는 미국을 중심으로 'slow and fast light'이라는 이름으로 수행되어 최근 몇 년 사이 많은 논문이 발표되었다 [1-4]. 일반에게도 잘 알려진 '17 m/s의 광속' [2] 이라던가 펄스를 진공 중의 빛의 속도보다 빠른 속도로 진행시키는 실험(superluminal propagation, 초광속) [3] 혹은 펄스의 정점이 매질에 입사하기 이전에 매질 밖으로 빠져나오는 음수 군속도(negative group velocity) [4] 등의 연구가 그 예라고 할 수 있다. 이 연구 주제가 응용 측면에서도 흥미를 끄는 이유는 차세대 초고속 광통신에 필수적인 전광학적 가변 광 지연 선로(all-optical variable delay line)나 미래의 광학 컴퓨터에 쓰일 광학 메모리, 위상 배열 안테나(phased-array antenna) 등에 적용이 가능하기 때문이다.

광학 매질에서 흡수 혹은 이득이 나타나는 공진 주파수 주변에서는 전자기학의 Kramers-Kronig 관계에 의해 진행하는 빛의 위상 변화, 즉 상굴절률의 변화가 발생한다. 좁은 대역의 급격한 상굴절률 변화는 광 펄스의 진행 속도를 결정하는 군굴절률에 큰 변화를 유도하기 때문에 이를 이용하면 광 신호의 전달 속도를 제어할 수 있다. 그 현상에 관한 이론적인 연구는 주로 원자의 흡수대역을 이용하여 빛을 진공 중의 속도보다 빠르게 진행시키는 초광속 현상을 중심으로 아인슈타인이 특수상대성 이론을 발표했던 1900년대 초에 활발히 진행되었지만, 조건의 특성상 광손실이 매우 크게 발생하기 때문에 실험적인 측면에서 큰 관심을 얻지는 못했다.

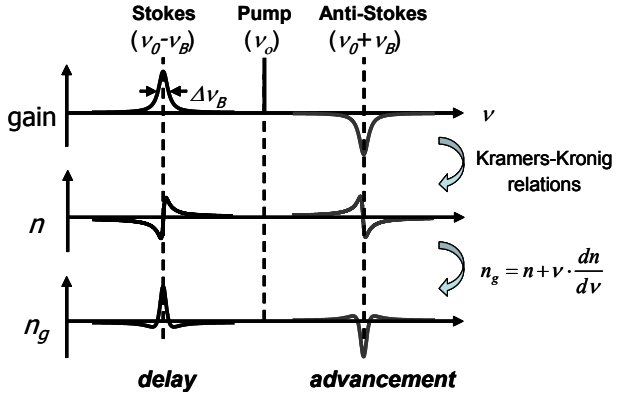
광속 제어에 관한 본격적인 실험 연구는 1990년대 초반 전자기적으로 유도된 투명성(Electromagnetically induced transparency, EIT)이 도입되면서 시작되었다. 이를 통해 매우 작은 광손실 상태에서 큰 굴절률 변화를 유도하는 것이 가능하게 되었지만, EIT를 기초로 한 실험은 극저온 혹은 고온 상태의 특수한 원자 기체, 고체 결정 등에서 진행되기 때문에 엄격한 실험 환경을 요하며, 광속의 가변이 어렵고, 고정된 파장에서만 실험이 이루어지는 단점이 있다.

2005년 광섬유 내 비선형 현상의 하나인 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)을 이용하여 빛의 속도를 제어하는 논문이 발표되었는데, 극도로 제한적이었던 실험 조건이 광섬유라고 하는 최고의 광학 매질로 바뀌면서 다양한 파장과 간단한 실험 장치를 이용하여 같은 결과를 얻을 수 있다는 점에서 광속 조절 연구에 큰 전환점이 되었다 [5]. 그 응용으로 긴 광 지연 선로의 구현 [6], 초광속 진행 및 음수 속도 진행 [7] 등의 연구 결과가 발표되었고, 유도 라만 산란(stimulated Raman scattering, SRS), 광 매개변수 증폭(optical parametric amplification, OPA) 등을 이용하여 비슷한 결과가 발표되는 등 [8, 9] 광섬유내의 비선형 광학 현상을 이용한 전광학적 광속 제어는 현재 많은 주목을 받고 있는 분야이다.

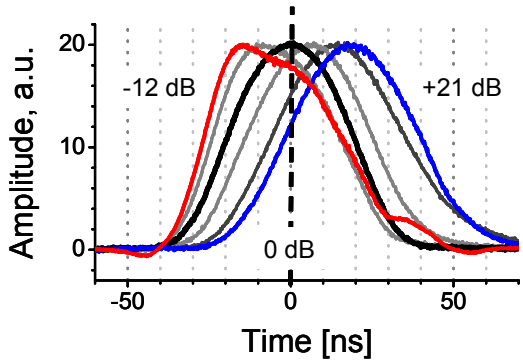
초기의 연구가 광속 변화 현상 자체에 주목했었다면, 최근의 연구는 그 효율성을 높이는 방향으로서 더 넓은 대역에서 더 많은 광 지연을 얻는 것을 목표로 진행되고 있다. 특히 SBS를 이용한 광속 제어

는 그 대역폭이 30−50 MHz 정도로 본래 수십 GHz − 수 THz 정도의 대역 폭을 갖는 OPA나 SRS를 사용한 방식에 비해 좁지만, 펌프광의 변조를 통해 그 대역폭과 굴절률 변화의 형태를 임의로 변형시킬 수 있어서 더 응용성이 높다고 할 수 있으며, 그 예로서 최근 SBS를 이용하여 25 GHz 정도의 대역까지 확대된 광속 제어 실험결과가 발표되기도 하였다 [10].

본 논문 발표에서는 SBS를 통한 연구를 위주로 그 동안 이루어 졌던 광섬유 내 광속 제어에 관한 이론 및 실험 결과들을 소개하고, 실제적인 응용을 위해 해결해야 할 현재 연구의 한계점도 함께 설명한다.



(a)



(b)

Fig. 1. (a) SBS를 이용한 광속 제어의 원리. (b) SBS 이득 및 손실에 다른 펄스의 전진 및 지연. 단 2 m의 광섬유를 사용한 경우 얻어진 펄스의 시간 궤적으로서 −12dB의 경우 펄스의 peak 지점이 매질에 입사하기 전에 매질 밖으로 나오는 음수 속도 진행에 해당한다.

1. R. W. Boyd and D. J. Gauthier, Ch. 6 in *Progress in Optics* **43**, E. Wolf, Ed. (Elsevier, Amsterdam, 2002), 497−530.

2. L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, C. H. Behroozi, Nature **397**, 594−598 (1999).

3. M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin and R. W. Boyd, Science **301**, 200−202 (2003).

4. A. M. Akulshin, S. Barreiro, and A. Lezema, Phys. Rev. Lett. **83**, 4277 (1999).

5. K. Y. Song, M. G. Herráez and L. Thévenaz, Opt. Express **13**, 82−88 (2005).

6. K. Y. Song, M. G. Herráez and L. Thévenaz, Opt. Lett. **30**, 1782−1784(2005).

7. M. G. Herráez, K. Y. Song, and L. Thévenaz, Appl. Phys. Lett. **87**, 081113 (2005).

8. J. E. Sharping, Y. Okawachi and Alexander L. Gaeta, Opt. Express **13**, 6092−6098 (2005).

9. D. Dahan and G. Eisenstein, Opt. Express **13**, 6234−6249 (2005).

10. K. Y. Song and K. Hotate, Opt. Lett. **32**, 217−219 (2007).