

Self-Focusing을 이용한 공진기 없는 광 쌍안정성

김두철* · 유영훈**

Optical Bistability based on Self-Focusing without Cavity

Kim Doo-chul,* Yu Young-hun**

Summary

We have studied the phenomenon of optical bistability based on the self-focusing. Our experiments were performed with a sodium and single reflecting mirror without cavity. It is found that the results of experimernrts are consistent with brief theoretical results and the optical bistability is insensitive to a frequency of input light.

서 론

광학적 비선형성과 케환 구조의 결합으로 일어나는 광 쌍안정(optical bistability)은 광 논리회로, 광 펄스 정형회로, 광 증폭기, 광 스위치, 광 기억 소자등에 이용될 수 있으며, 광 통신, 광 컴퓨터 등의 기본 소자로서 각광을 받고 있다(Gibbs, et al., 1985; Oudar and Kuszelewicz, 1982; Chen, 1985). 이러한 광 쌍안정은 1969년 Seidal에 의해서 처음으로 예언된 후, absorptive 광 쌍안정은 Bonifacio와 Lugiato에 의해서 관측되었고, dispersive 광 쌍안정은 Gibbs에 의해서 관측되었다(Seidal, 1969; Bonifacio and Lugiato, 1975;

Gibbs, et al, 1976). 이러한 광 쌍안정은 공진기(cavity)의 etalon효과와, 전자의 경우 흡수계의 광 세기 의존성에 의한 것이고 후자의 경우는 굴절율의 광 세기 의존성에 의해서 일어난다. 지금까지의 대부분의 광 쌍안정은 공진기의 etalon효과를 이용하였으나 이것은 공진기가 없는 경우 보다 제작상의 어려움이 있고 또한 출력이 불안정하다.

본 연구에서 다물 공진기가 없는 dispersive 광 쌍안정은 공진기의 etalon효과를 이용하지 않는 경우로서, 제작이 간편하고 안정된 출력을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 광 세기에 의존하는 비선형 굴절율 가진 Sodium과 하나의 케환 거울로 계(system)를 구성하여 실험적으로 광 쌍안정을 구

* 자연과학대학 물리학과

** 고려대학교 물리학과

하고 이를 간단한 이론과 비교 검토하였다.

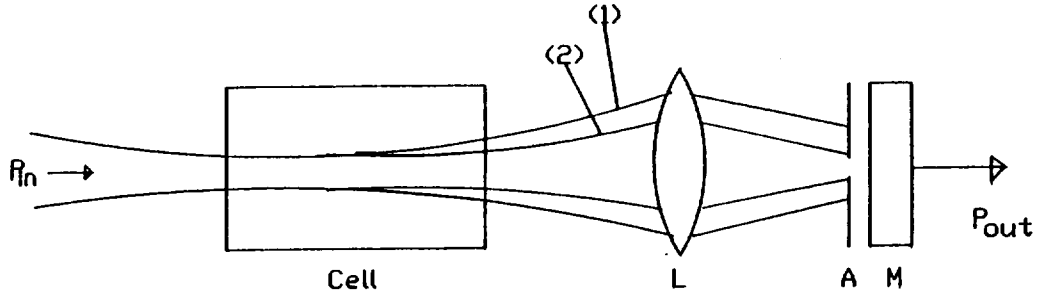


Fig. 1. Generalized schematic diagram as an optically bistable device based on the self-focusing of light. (a) : normal propagation (b) : self-focusing. A : aperture M : mirror

이론

그림1과 같은 계(system)에서 렌즈를 이용하여 레이저 빛을 매질에 입사 시킨다. 여기서 레이저 빛은 gaussian intensity 분포를 갖으며, 매질은 입사 빛의 세기에 따라 굴절율이 변화하는 비선형 매질이다. 그리고 매질을 통과한 빛을 aperture와 거울을 사용하여 다시 매질에 반환시킨다. 매질내에서의 빛의 세기 분포는

$$I(r) = I_0(z) \exp(-2r^2/w^2) \dots\dots\dots (1)$$

이다. r 은 입사면의 좌표이고 $w=w(z)$ 는 레이저 빛의 진행거리에 따른 spot size이다. $z=0$ 에서 spot size를 w_0 라 하면 비선형 굴절율이 없는 경우 ($n_2=0$) 빛의 진행 경로에 따른 spot size는 $w(z) = w_0 [1 + (2z/b)^2]$ 이고, $b(b = 2P_{in}n_0^2/\lambda)$ 는 confocal parameter이다(λ 는 입사빛의 파장). 그리고 P_{in} 는 입사빛의 power이고 n_0 은 매질의 선형 굴절율이다.

입사 빛의 파장이 confocal parameter 보다 매우 클때 ($4\lambda^2/b^2 \gg 1$) self-focusing이 없으면 비선형 매질을 진행하는 빛은 그림 1의 (a)와 같이 퍼질것이고, self-focusing이 있는 경우에는 (b)와

같이 빛이 진행할 것이다.

매질의 굴절율은 $n = n_0 + n_2 I$ 이며, I 는 매질에 입사하는 빛의 총 세기이다. 매질의 비선형 굴절율 n_2 에 의해서 매질이 마치 lens와 같이 행동한다. 즉 (1)식에서 입사면의 위치에 따라 빛의 세기가 다르므로 각 위치에서의 굴절율이 다르고 따라서 각 위치에 따라 광 노정의 차이가 있게 된다. 만약 $n_2 > 0$ 이면 빛이 모이게 되고(self-focusing), $n_2 < 0$ 이면 입사 빛은 발산하게 된다(self-defocusing) (Shen, 1984).

$n_2 > 0$ 인 경우 매질내에서 레이저 빔의 spot size는

$$w(z) = w_0 [1 + P_0/P_{cr} (2z/b)^2]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

이다(Akhmanov, et al., 1972). P_0 는 매질내의 effective power이고 P_{cr} 은 self-focusing이 생기기 위한 임계 power ($P_{cr} = \lambda^2 c / 64 P^2 n_2$)이다. (2)식에서 보면 $P_0 < P_{cr}$ 인 경우는 빛이 발산하고 $P_0 > P_{cr}$ 이면 빛의 spot size가 빛 진행 방향에 따라 작아진다. 특히 $P_0 = P_{cr}$ 이면 spot size가 변화하지 않고 매질내를 진행한다(self-trapping). 비선형 매질을 통과한 빛의 상을 lens에 의해서 aperture를 통과

하여 반사율 R인 거울에 맺게하고 거울을 빛의 진행 방향에 수직으로 장치하여 빛을 매질에 제한시킨다.

비선형 물질에 도달하는 effective power P_o 는 $P_o = P_{in} + 2P_r$ 이고, P_r 는 aperture와 거울에 의해 제한되는 양이다. aperture의 지름을 $2a$ 라 하고 aperture를 통과하는 율을 f 라 하면

$$f = 1 - \exp[-2a^2/m^2w(z)^2] \dots\dots\dots (3)$$

로 주어진다(Bjorkholm, et al, 1982). 여기서 $w(z)$ 은 (2)식에 의해 계산되며 m 은 lens의 배율이다. 입사 power에 대한 출력 power를 계산하기 위해서 $P_r = RfP_{in}$ 이라하면

$$P_{in}/P_{cr} = (P_o/P_{cr}) [1/(1+2Rf)] \dots\dots\dots (4)$$

$$P_{out}/P_{cr} = (P_o/P_{cr}) [(1-R)f/(1+2Rf)] \dots\dots (5)$$

이다. (2), (3), (4), (5)식에 의한 광 쌍안정 계산 결과는 그림 2와 같다.

실험 및 결과

self-focusing 효과와 single mirror에 의한 제한 효과를 이용한 광 쌍안정 실험을 위하여 그림 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. Sodium Cell의 effective 길이는 25cm이며, Cell의 온도는 300°C

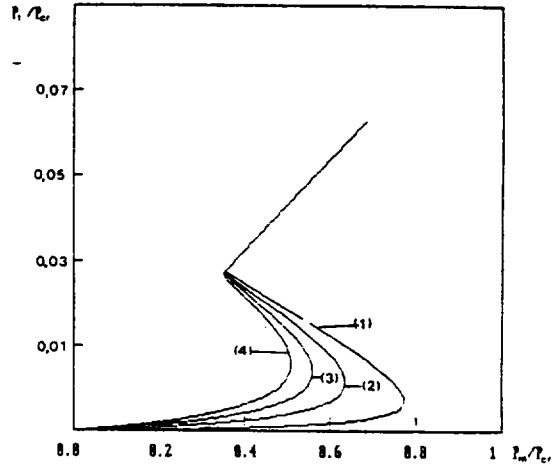


Fig. 2. Output-input curves calculated using (2). $2z/b = 5.85$, $m = 1$, $R = 0.99$ and various values for a^2/w_0^2 . (1) = 0.2 (2) = 0.4 (3) = 0.6 (4) = 0.8

이고 Na의 밀도는 $2.02 \times 10^{13}/cm^3$ 이다. Ring-Dye 레이저의 single mode 출력을 초점거리 30cm인 lens를 사용하여 매질 첫단에 spot size가 $110\mu m$ 되게 입사시켰다. sodium이 없을시 (normal propagation) cell 끝단에서 beam size는 $180\mu m$ 이다. 매질을 통과한 빛을 초점거리 6.4cm인 렌즈를 사용하여 반사율이 95%인 거울에 상이 맺히게 하였다. 거울은 상의 배율이 1인 위치에 장치하였고 aperture size는 $100\mu m$ 이다.

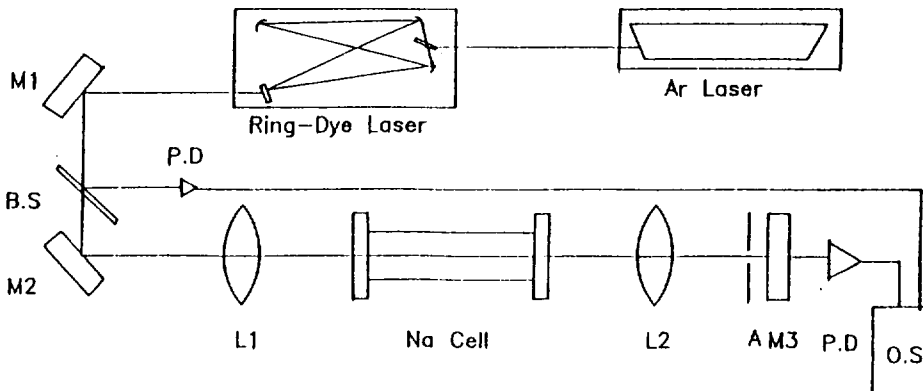


Fig. 3. Experimental schematic diagram. M : mirror, L : lens, A : aperture, P.D : photo diode, O.S. : oscilloscope, B.S. : beam splitter, L1 (f= 30cm), L2 (f= 6.5cm)

먼저 intensity에 따른 self-focusing 효과를 보기 위해 그림 3에서 M3, A, L2를 제거하고 Cell 끝단에서 2m되는 곳에 screen을 설치하고 입사 빛의 intensity를 변화시켜 보았다. 이때 입사 빛의 주파수는 D1에서 약 1.4GHz로 떨어져 있다. 그 결과 그림 4와 같이 입사 빛의 세기가 115mW 이상에서 self-focusing 효과가 나타났다.

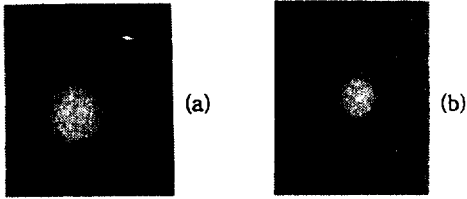


Fig. 4. Far field patterns of laser beam after passing through the sodium cell for (a) normal (b) self-focusing

광 쌍안정을 구하기 위해 M3, A, L2를 설치하고 입사 빛 세기에 따른 출력 빛의 세기를 측정하였다. 그리고 주파수 의존성을 보기 위해 입사 빛의 주파수를 변화시켜 보았다. 그 결과는 그림 5와 같다.

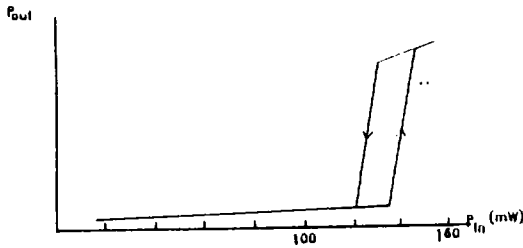


Fig. 5. Experimental curve of P_{in} versus P_{out} with parameters adjusted so that the device exhibits self-focusing.

$2a = 100\mu m$, $R = 0.95$.

결 론

self-focusing 효과와 single mirror의 제한에 의한 광 쌍안정 현상을 관찰하였다. 제한 양에 따

른 광 쌍안정을 간단한 이론으로 계산하여 실험 사실과 비교하여 보았다. 또한 입사 빛의 주파수를 변화시켰을 때도 안정된 쌍안정 출력을 얻을 수 있었다. 그러나 (2)식에서 비선형 굴절률 n_2 가 포함되지 않는다는 가정에서 (4), (5)식을 구했으나, 실제로는 비선형 굴절률은 포함되므로 (4), (5)식은 변화되어야 하며 그 결과 좀더 정확한 광 쌍안정을 계산으로 얻을 수 있다고 본다.

참 고 문 헌

- Akhmanov, S.A., Kholov, R.V., and Sukhorukov, A.P., 1972, Laser Handbook, North-Holland, Netherlands; 1151-1228.
- Bonifacio, R., and Lugiato, L.A., 1975, Cooperative radiation processes laser, *Phys. Rev.*, All: 1057-1061.
- Bjorkholm, J.E., Smith, P.W., and Tomlinson, W.J., 1982, Optical bistability based on self-focusing an approximate analysis, *IEEE quantum-electronics QE-18*: 2016-2022.
- Chen, Y.C., and Lugiato, L.A., 1985, Polarization bistability in semiconductor laser, *Appl. Phys. Lett.*, 46, 1-6.
- Gibbs, H.M., 1985, Optical Bistability: Controlling Light with Light, Academic Press, New York.
- Gibbs, H.N., McCall, S.L., and Venkatesan, T.N.C., 1975, Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot interferometer, *Phys. Rev. Lett.*, 36: 1135-1137.
- Oudar, J.L., and Kuszelewicz, R., 1984, Demonstration of optical bistability with intensity-coupled high gain lasers, *Appl. Phys. Lett.* 45: 15-17.
- Seidal H., 1969, U.S. Patent No. 3610731.
- Shen, Y.R., 1984, The Principles of Nonlinear Optics, John Willy & Sons.