

광섬유에 대한 문턱에서의 유도 브릴리앙 산란의 혼돈현상 - feedback 이 있는 경우

Chaotic stimulated Brillouin scattering near the threshold in a fiber with feedback

이상훈*, 이대식**, 김철민***

*서남대학교 물리학과, **한국전기연구원, ***광 혼돈 현상 제어연구단 배재대학교

chmkim@mail.paichai.ac.kr

1990년에 Harrison 등은 cw Nd:YAG 레이저를 양끝이 비스듬히 절단된 단일 모드 광섬유에 입사시켰을 때 강하고 불규칙적인 유도 브릴리앙 산란(stimulated Brillouin scattering; SBS)이 일어남을 발견하였다.⁽¹⁾ 또 수직으로 절단된 광섬유에 pump wave를 입사시킴으로써 광섬유 내에서 pump wave와 Stokes wave의 내부반사가 있는 조건을 만들어 주었을 때 SBS는 limit cycle을 갖는 특성으로부터 quasi-periodicity를 거쳐 chaotic하게 변화한다는 것을 보였다. 이와 같은 현상을 광섬유 내에서 pump wave와 Stokes wave의 nonlinear optical coupling에 의한 것으로서 설명하였으며 SBS가 chaotic한 것은 바로 이와 같은 feedback에 의한 것으로 간주하였고⁽²⁾ 이를 컴퓨터 simulation을 통하여 보였다.⁽³⁾ 그러나 feedback이 없는 경우, 특히 문턱근처에서의 불규칙적인 형태의 SBS신호는 이것이 chaotic한 특성을 갖는지 혹은 stochastic한 특성을 갖는지에 대해 명확한 결론을 얻기 어려웠다. Harrison등은 chaotic하다는 실험결과들을 내놓았고⁽¹⁾ Gaeta등은 stochastic하다는 실험결과를 내놓았다.⁽⁴⁾ 이와 같은 SBS의 특성을 구분 짓기 위해 Dammig등은 불규칙한 SBS 신호의 attractor dimension을 분석한 결과 system dimension이 증가함에 따라 dimension이 발산한다는 것을 보임으로서 문턱에서의 불규칙한 SBS는 stochastic하다는 것으로 결론을 내렸다.⁽⁵⁾ 그리고 이와 같은 현상은 주로 stochastic 한 특성을 갖는 자발 브릴리앙 산란(spontaneous Brillouin scattering)에 의한 것으로 결론지었다. 이와 같은 논쟁 후에 Harrison등도 feedback이 없는 경우 문턱근처에서의 불규칙한 SBS가 stochastic하다는 것을 확인하였고 그렇게 결론을 내렸다.⁽⁶⁾

그렇지만 최근에 feedback이 없는 경우 문턱근처에서의 불규칙한 SBS가 bifurcation point 근처에서 일어나는 chaotic behavior중 하나인 on-off intermittency 현상이라는 것을 보임으로서 그것이 chaotic하다는 것이 보고되었다.⁽⁷⁾ 그리고 거기서 함께 나타나는 stochastic 한 특성을 갖는 spontaneous Brillouin scattering 효과가 외부 노이즈처럼 작용하여 SBS를 stochastic 한 것으로 보이게 한다는 것을 보였다. 왜냐하면 함께 나타나는 stochastic 한 특성을 갖는 spontaneous Brillouin scattering 때문에 SBS를 문턱근처에서의 correlation dimension 분석을 통해 그것이 chaotic하다는 것을 규명한다는 것은 매우 어려운 일이기 때문이다. 그러면 왜 feedback이 있는 경우에는 correlation dimension을 통해 SBS가 chaotic하다는 것을 알 수 있는가하는 의문이 생기게 된다. 그리고 역시 무엇이 feedback이 있을 때와 없을 때의 SBS를 그 같은 차이를 생기게 하는 것인가 하는 의문을 갖게 한다.

이와 같은 의문에 대한 답을 얻기 위해 광섬유 양 끝을 수직으로 절단하여 내부 feedback을 줄으로써 문턱 근처에서 SBS의 비선형 동역학 현상을 조사하였다. input pump power를 점진적으로 증가시켜 광섬유에 대한

문턱 근처에서의 SBS 신호를 관찰함으로써 SBS-off 상태에서 SBS-on 상태로 전이되는 경로에 대해 초점을 맞추어 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 광섬유에 내부 feedback이 주어졌을 때는 stochastic property를 갖는 spontaneous Brillouin scattering 효과가 feedback 효과로 인해 없어지거나 매우 작아짐을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 feedback이 있는 경우에서의 SBS가 feedback이 없는 경우에 비해 chaotic 한 특성이 상대적으로 명확히 나타날 수밖에 없는 이유가 됨을 알 수 있다.

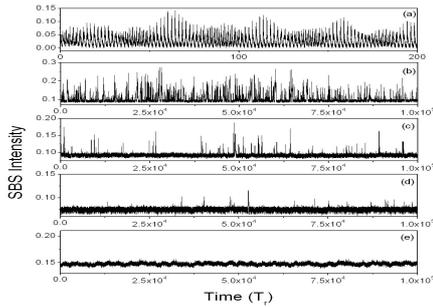


Fig. 1. Time series of SBS near the threshold depending on the input pump power.

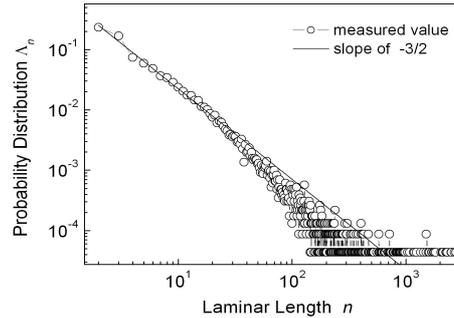


Fig. 2. Probability distribution of laminar phases versus laminar length.

감사의 글

본 연구는 한국 과학 기술부 창의 연구 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. R. G. Harrison, J. S. Uppal, A. Johnstone, and J. V. Moloney, "Evidence of chaotic stimulated Brillouin scattering in optical fibers", Phys. Rev. Lett. 65, 167 (1990).
2. W. Lu, A. Johnstone, and R. G. Harrison, "Deterministic dynamics of stimulated scattering phenomena with external feedback", Phys. Rev. A 46, 4114 (1992).
3. D. Yu, W. Lu, and R. G. Harrison, "Physical origin of dynamical stimulated Brillouin scattering in optical fibers with feedback", Phys. Rev. A 51, 669 (1995).
4. A. L. Gaeta and R. W. Boyd, "Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber", Phys. Rev. A 44, 3205 (1991).
5. M. Dammig, G. Zinner, F. Mitschke, and H. Welling, "Stimulated Brillouin scattering in fibers with and without external feedback", Phys. Rev. A 48, 3301 (1993).
6. R. G. Harrison, P. M. Ripley, and W. Lu, "Observation and characterization of deterministic chaos in stimulated Brillouin scattering with weak feedback", Phys. Rev. A 49, R24 (1994).
7. S. H. Lee and C. M. Kim, "Chaotic stimulated Brillouin scattering near the threshold in a fiber", Opt. Lett. 31, 3131 (2006).