

## 발전 임계치에서 Nd:YAG 레이저의 발전 특성

김철민, 공승환, V. Ivanov, K. Volodchenko

배재대학교 물리학과 광혼돈제어연구단

chmkim@mail.paichai.ac.kr

레이저는 입력을 증가시킴에 따라 레이저의 꺼짐 상태에서 레이저의 켜짐 상태로 전이한다. 그러나 그 전이 현상에 대해서는 아직 밝혀진 바가 없다. 이때까지 이 현상은 처음 자발전이의 빛이 점점 유도전이로 바뀌며 그 빛이 점점 세어져 레이저의 출력이 생기기 시작하고 이것이 레이저 입력의 증가에 따라 연속적으로 발전하는 것으로 알려져 왔다. 그러나 이러한 결과에 반대되는 결과들이 최근 밝혀지고 있다[1-2]. 그것은 이산화탄소 레이저에서 이득을 변조시키면 방전이 불안정해지고 그 결과 레이저의 출력도 불안정해 지는데 특히 발전 문턱 근처에서 레이저의 출력은 불규칙 적으로 레이저의 출력이 사라지는 현상이 생긴다는 것이다[1]. 또 다른 하나는 cw Nd:YAG 레이저를 아크 램프로 여기시켜 발전시키면 발전 문턱 근처에서 이 레이저의 출력도 불규칙적으로 레이저의 출력이 사라지는 것으로 나타난다[2]. 이 현상은 레이저의 입력을 증가시킴에 따라 레이저의 꺼짐 상태에서 발전 상태로 전이할 때 그 중간에 불규칙적인 레이저의 꺼짐 상태가 존재한다는 것이 된다. 이 현상이 비선형 동력학의 특이한 현상 중의 하나인 on-off 간헐성임[3]이 밝혀졌다.

여기서는 Q-switching과 mode locking 등으로 레이저를 손실 변조시킬 때 Nd:YAG 레이저의 출력이 어떤 과정을 통해 전이하는지를 관찰하였다. 이 레이저들에서도 발전 임계치에서는 불규칙적인 레이저의 꺼짐과 켜짐이 반복하는 것을 관찰할 수 있었는데 이 현상도 비선형 동력학적 특성의 하나인 on-off 간헐성에 의해 나타나는 것이다.

이 현상을 관찰하기 위하여 처음은 아크 램프로 여기된 Nd:YAG 레이저 공진기 내부에 Q-switcher를 장착하고 레이저의 발전을 임계치 까지 낮춘 후 변조 주파수, 레이저 입력, 변조 폭에 따라 이 레이저에서 생기는 on-off 간헐성의 특성을 보고 그 임계지수 값을 구하였다. 그 결과 이 레이저는 발전 임계치 근처에서 꺼짐 상태의 길이와 그 확률 분포를 구한 결과 꺼짐 상태의 길이가 짧은 영역에서는  $P(n) \propto n^{-3/2}$ 의 임계지수를 얻을 수 있었고, 긴 영역에서는 지수적으로 감소하는 확률 분포를 보였으며 그 사이에서는 shoulder가 나타남을 관찰할 수 있었다. 아울러 입력 에너지에 따른 평균 꺼짐 상태의 길이의 변화는  $\langle n \rangle \propto |I - I_c|^{-1}$ 의 임계지수 값을 구함으로 이 현상이 on-off 간헐성의 임계지수 값을 가지고 있음을 확인하였다.

이런 특성을 mode-locking된 레이저에서도 관찰하였다. 먼저 이 레이저 내부에 mode-locker를 설치한 후 정상적인 mode locking 레이저를 발전 시켰다. 그 후 이 레이저의 길이를 변화시켜 레이저 빛의 공진기 왕복시간이 변조 주파수와 달라지게 하여 레이저 발전을 멈추게 하였다. 그 후 레이저 공진기 길이를 변화시키면서 이때 생기는 레이저 출력의 변화를 살폈다. 이때도 레이저의 공진기 길이가 변조 주파수 쪽으로 가면서 가끔씩 나타나는 mode-locking된 레이저의 출력을 볼 수 있었는데 이때 레이저 출력 사이에 긴 레이저 꺼짐 현상이 생겼으며 공진기의 길이가 변조주파수에 다가감에 따라 레이저 꺼짐 상태의 길이가 점점 줄어들면서 정상적인 mode-locking 레이저 출력으로 바뀌었다. 여기서는 발전 임계치 근처에서 꺼짐 상태의 길이와 그 확률 분포를 구한 결과  $P(n) \propto n^{-3/2}$ 의 임계지수를 얻을 수 있

었고 공진기 길이에 따른 평균 꺼짐 상태의 길이의 변화는  $\langle n \rangle \propto |L - L_d|^{-1}$ 의 임계지수 값을 구함으로 이 현상이 on-off 간헐성의 임계지수 값을 가지고 있음을 확인하였다.

여기서 Q-switching 레이저에서 나타나는 shoulder는 잡음이 있는 경우에 나타나는 전형적인 특성인데 이것은 레이저 자체가 이미 양자 잡음, 방전 잡음, 등 외부 잡음을 가지고 있기 때문에 생기는 것이다. 이에 비하여 mode-locking 레이저는 이런 잡음의 기여가 적어 shoulder가 나타나지 않는 것으로 분석된다. 이 결과들은 레이저의 발진이 꺼짐 상태에서 발진 상태로 전이할 때 어떤 경로를 통하여 전이하는가를 보여주는 결과로서 상전이 현상과 유사하다. 특히 레이저에서 이 상전이 현상은 on-off 간헐성을 통하여 전이한다는 것인데 여기서는 이런 현상이 왜 생기며 이 현상에 영향을 주는 것이 어떤 문제인지를 computer simulation을 통하여 확인하였다.

computer simulation을 통하여 나타나는 결과도 실험에서와 같은 현상을 가짐을 알 수 있었고 그 이유는 레이저 발진에 영향을 미치는 내부 계수가 레이저 자체의 특성에 의해 섭동을 받아 이러한 문제를 야기시킨다는 것을 밝혔다.

#### 참고문헌

- [1] C. M. Kim, G. S. Yim, Y. S. Kim, J. M. Yang, submitted to EuroPhys. Lett.
- [2] S. H. Gong, C. M. Kim, D. I. Kim, K. U. Kim, OSA Annual Meeting, 1999. 10.
- [3] N. Platt, E.A. Spiegel, and C. Tresser, Phys. Rev. Lett, 70, 279 (1993).