15th Optics and Quantum Electronics Conference (8 19~20, 1998)

레이저에서의 혼돈과 그 제어

김철민
배재대학교, 물리학과

레이저는 대표적인 비선형동력학계로서 여기서 일어나는 다양한 혼돈의 특성에 대해서는 많이 연구되어 왔다. 레이저에서의 이러한 혼돈은 레이저 출력의 불안정성의 주요 원인이 되고 있으며 최근에는 이러한 불안정한 원인을 제어하여 안정화시키고자하는 노력들이 기울어져 왔다. 여기서는 레이저에서 일어나는 혼돈의 양상이 어떤 것이며 이러한 혼돈으로 인한 불안정성을 제어하여 레이저를 안정화시키는 방법과 그 응용을 다루고자 한다. 이를 위해 먼저 일반적 레이저의 혼돈의 종류와 원인을 밝히고 이의 안정화를 위하여 다이오드 레이저로 들띄워진 Nd:YAG 레이저의 다중모드 발진 및 제 2차 고조파의 불안정성과 이의 제어, Q-Switching된 Nd:YAG 레이저의 불안정성과 그 제어에 대하여 설명하고자 한다.

fp이저는 그 rate equation에서 알 수 있듯 다양한 혼돈 특성을 관찰할 수 있는 아주 좋은 비선형계의 하나이다. 이런 특성으로 인해 비선형성 및 레이저 발진 현상을 좀 더 깊이 있게 이해하고 레이저의 응용성을 증가시키기 위해 이와 관련된 논문은 Phys. Rev. Lett.에만 십여년간 수십편이 발표되어 왔다. 이런 레이저의 비선형성은 1975년 Haken이 Maxwell-Bloch식이 비선형계의 하나인 Lorenz 식과 유사하다는 사실을 밝히고, Ikeda는 이 식을 이용하여 고리형 공진기에 흡수체가 있을 때 입사된 레이저 빛이 이 공진기를 통과하면 주기배가 갈래질과 혼돈이 생긴다는 사실을 이론과 실험으로 확인함으로써 레이저에서의 혼돈이 많은 비선형동력학 연구자들과 레이저 연구자들에 의해서 연구되었다. 이 결과로서 레이저 자체에서의 혼돈뿐 아니라 Q-switching 및 Mode-locking된 레이저에서의 혼돈등에 대하여 많은 연구 결과들이 발표되기 시작하였고 이 결과들은 레이저의 종류에 따라 고유한 혼돈적 특성이 나타남에 따라 Maxwell-Bloch식의 특성에 의해 A, B, C의 세가지 종으로 분류하게 되었다. 그런데 레이저에서의 이런 혼돈적 특성은 레이저 발진의 불안정성을 유발하게 되어 응용에 많은 문제점을 야기시키게 되었다. 그래서 이런 불안정성을 해결하기 위해 레이저의 안정화에 대한 연구가 최근 활발하게 이루어져 레이저에서의 혼돈도 안정화시킬 수 있는 길이 열리게 되었다. 이런 레이저에서의 불안정성을 해결하여 레이저를 안정화시키는 일은 혼돈제어법을 사용하게되는데 이는 혼돈을 혼돈궤적 내에 존재하는 불안정궤적으로 안정화시킴으로서 전체적인 출력의 손실없이 레이저의 평균 혹은 그 이상 출력에서도 안정한 레이저 발진이 이루어지게됨에 따라 레이저의 응용 가능성을 더욱 확대시켜 놓았다. 이러한 최근의 연구 방향에 대한 이해를 돕기 위해 여러 레이저 중 상업적 이용이 큰 Nd:YAG 레이저를 이용하여 이 레이저에서 생기는 다양한 혼돈적 특성은 어떠하며 이를 안정화하기 위해서는 어떤 방법들이 쓸 수 있는지를 보기로하자.

Nd:YAG 레이저는 B종 레이저로서 이 레이저가 다중모드로 발진할 때, 공진기 내부에 KTP결정을 넣어 제 2차 고조파를 발진할 때 혹은 Q-switching될 때 등 다양한 상황에서 여러 혼돈적 특성을 보이게 된다 이중 먼저 횡모드 발진의 경우부터 살펴보기로하자. 이 레이저에서 횡모드가 발진할 때는 발진 횡모드 끼리의 간격이 가까와 모드들간의 이득 경합에 의해 레이저의 발진은 혼돈을 보이게 된다. 이것은 Maxwell-Bloch 식에서 모드의 발진 갯수를 더하고 이것이 공진기의 거울에 의해 반사될 때 Kirchoff-Fresnel 적분에 의해 계산할 수 있는데 이 계산은 Hollinger등이 잘 설명하였다. 그런데 이 문제는 실제 레이저에서 조금의 횡모드들만 생겨도 레이저 출력이 불안정해지는데 이를 해결하기 위하여 레이저의 출력을 줄이더라도 레이저의 발진이 안정화될 수 있도록 내부에 aperture를 삽입하여 안정화시킨다. 그러나 이 경우 레이저의 출력이 많이 감소하여 심지어는 20%이하로 그 출력이 줄기도 하는데

이 출력의 감소를 해결하면서 레이저의 출력을 안정화시키는 방법으로서 혼돈 제어법을 사용하면 된다. 여기서는 taming chaos의 방법을 이용하여 이 레이저의 출력을 안정화시키는 방법에 대하여 설명한다.

두번째로는 이 레이저의 제2차 고조파는 초록빛 레이저를 발진시키는데 이 초록빛 레이저는 Nd:YAG 레이저 공진기 내부에 비선형 결정을 넣어서 발진 시키게 된다. 그런데 이때 레이저의 발진 편광과 결정의 광축 방향이 어긋나게되면 그 내부에 복굴절 현상이 생겨 이 레이저는 복잡한 혼돈을 만들게 된다 이 문제에 관해서 이미 많은 연구들이 진행되었으나 이 레이저의 출력을 안정화시킬 수 있는 방법은 별로 없었고 레이저의 출력이 불안정하게 발진하면 외부에 적절한 광학 장치를 이용하여 이 레이저의 출력을 안정화시키는 방법이 주로 사용되었다. 이 방법의 해결을 위하여 OGY(Ott, Grebogi, Yorke)법이라 불리는 혼돈제어법으로 평균 출력에는 변함 없이 이 레이저를 혼돈을 여러 불안정 주기로 혼돈을 안정화시킬 수 있다.

마지막으로는 이 레이저를 Q-Switching시킬 때 생기는 혼돈에 대하여 설명하고자 한다. 이 레이저는 공업용으로 drilling 등에 상용화되어 있는데 이 레이저를 Q-Switching 시켜 이를 응용하고자 하면 낮은 반복율에서는 안정된 출력을 보이나 반복율을 증가하면 주기배가 갈래질을 통한 혼돈이 생기기 시작한다. 일반적으로 안정된 출력을 위한 반복율 5 kHz 이하로 주로 제한되어 있는데 이는 이 레이저의 효율과 직결되고 있다. 즉 레이저의 출력을 증가시키면 혼돈으로 인하여 드릴링의 균일성이 문제가되고 반복율이 낮으면 여러대의 레이저를 사용해야하는 불편함이 따른다. 이를 해결하기 위하여 이 레이저의 출력을 유지하면서 반복율을 5 kHz 이상으로 증가시켜 한대의 레이저로 여러대의 레이저가 할 수 있는 일을 동시에 하고자하면 결국 이 레이저의 혼돈을 안정화시켜 그출력을 균일하게 만들어야 한다. 이 방법으로서 되돌이 본뜨기를 이용한 혼돈의 안정화 방법으로 이 레이저의 혼돈을 안정화시킨 결과를 보이도록 하겠다.

이상의 결과들은 혼돈으로 인해 레이저의 불안정성을 어떻게 제어하여 안정화시킬 수 있는지를 잘 보여준다. 레이저에서 생기는 이런 형태의 다양한 혼돈을 제어하는 많은 혼돈의 안정화 방법들이 많이 개발되어 있다. 그 방법으로서는 위의 방법들외에도 시간 지연계에서의 일반적 되돌이 본뜨기를 이용한 방법, Pyragas 방법, immigration 방법, targeting 방법 등 많은 방법들이 있다. 이 방법들을 이용하면 앞서의 설명대로 레이저의 평균적 출력에는 손실없이 다양한 주기로 다양한 레이저의 혼돈을 안정화시킬 수 있게 된다. 이러한 혼돈 제어 기술은 레이저의 안정화에 앞으로 폭넓게 사용될 것으로 예견되며 레이저 이외의 실생활에도 미래에 보편적으로 사용될 수 있는 기술이 될 것으로 기대된다.