

재생형 위상 변조에 의한 '8'자 구조 광섬유 솔리톤 레이저의 고차 조화 모드록킹

윤승철 · 박희갑*

전북대학교 물리학과

(1998년 10월 12일 받음, 1999년 2월 19일 수정본 받음)

고반복률의 안정된 솔리톤 펄스열 출력을 얻기 위해 재생형 위상 변조에 의한 고차 조화 모드록킹 방식을 '8'자 구조 광섬유 레이저에 적용하고 실험하였다. 레이저 펄스 출력의 종모드간 맥놀이 스펙트럼으로부터 모드록킹 기본 주파수의 96차 고조파인 400 MHz 성분을 추출하고, 이를 증폭하여 공진기 내의 위상 변조기를 구동함으로써 변조기의 변조 신호에 따라 등간격으로 정렬된 솔리톤 펄스열 출력을 얻을 수 있었다. 이때 솔리톤 펄스의 반치폭은 930 fs, 반치 파장선폭은 3.1 nm였으며, 펄스폭과 주파수 대역폭의 곱이 0.359로써 변환한계에 가까운 솔리톤 펄스임을 알 수 있었다. 변조 주파수가 레이저의 종모드간 주파수 차이와 언제나 정확히 일치하므로 능동형 모드록킹에서 흔히 요구되는 공진기 길이의 조절없이도 안정적인 고차 조화 모드록킹이 가능하였다.

I. 서 론

광섬유 레이저로 초단펄스를 얻기 위한 방법으로 모드록킹 방식을 주로 이용한다. 광섬유 레이저의 모드록킹 방식은 크게 능동형과 수동형 모드록킹으로 나눌 수 있으며, 각각의 방식을 광섬유 레이저에 적용하여 얻은 실험결과들이 보고되어 왔다.^[1-7]

광섬유 레이저에서 능동형 모드록킹을 사용하여 얻을 수 있는 펄스폭은 ps 급으로 수동형 모드록킹에 비해 비교적 넓다.^[1] 그러나 능동형 모드록킹의 가장 큰 장점은 외부에서 가해지는 변조 주파수에 따라 변조가 되기 때문에 펄스의 반복률을 제어할 수 있는 전기적인 기준점이 존재한다는 점이다. 반면에 수동형 모드록킹의 경우, ps 이하의 짧은 펄스폭을 가지는 초단펄스를 얻을 수 있다.^[2] 그러나 능동형 모드록킹과는 달리 공진기 내에서 펄스들간의 상대위치를 규제할 수 있는 방법이 없으므로 동시에 여러 개의 펄스가 공진기 내에 임의의 시간간격으로 존재할 수 있다. 특히 수동형 모드록킹된 광섬유 솔리톤 레이저의 경우, 펄스가 임의의 간격으로 나타나거나 펄스 반복률이 불안정한 문제점을 가지고 있다.^[3]

광섬유 레이저는 일반적으로 다른 종류의 레이저에 비해 공진기의 길이가 매우 길기 때문에 모드록킹에 의해 발생된 펄스의 기본 반복률이 상대적으로 매우 낮다. 따라서 광섬유 레이저의 실용성을 높이기 위해서는 펄스의 반복률을 높여야 하며, 이를 위해 고차 조화 모드록킹(이하 줄여 조화 모드록킹이라 함)이 바람직하다. 또한 광섬유 레이저는 긴 공진기 길이로 인해 외부에서 온도의 변화나 진동과 같은 섭동이 공

진기에 가해지는 경우, 공진기 길이의 변화로 인해 종모드 간격이 불규칙적으로 변하게 된다. 이러한 종모드 간격의 불안정성이 다른 레이저에 비해 크므로 오랜 시간 동안 최적의 동작 조건을 유지하기가 어렵다. 특히 능동형 모드록킹을 이용한 광섬유 레이저의 경우, 공진기 왕복 주파수와 외부 변조 주파수를 일치시키기 위해 공진기 길이를 미세하게 조절하거나 안정화시키는 것이 반드시 필요하다.^[4]

그러나 재생형 위상 변조에 의한 모드록킹 방식을 이용할 경우 능동형 모드록킹 방식의 이러한 문제점을 쉽게 해결할 수 있다. 재생형 변조에 의한 모드록킹 방식은 검출된 레이저 출력 펄스 스펙트럼으로부터 종모드간 맥놀이 주파수 성분을 추출하여 공진기 내부의 변조기를 구동한다. 이 방식을 사용하는 경우 외부 환경 변화에 의한 레이저 출력의 변화가 언제나 변조기 구동 주파수로 귀환되기 때문에 능동형 모드록킹에서 처럼 공진기 길이의 미세 조절 없이도 모드록킹이 가능하다. 또한 공진기의 기본 주파수의 특정 정수배의 고조파 성분을 변조 주파수로 사용하는 조화 모드록킹이 용이하므로 고반복률의 펄스열을 쉽게 얻을 수 있는데, 이 방식으로 조화 모드록킹된 고리형 구조의 광섬유 레이저의 실험 결과가 보고된 바 있다.^[5]

본 논문에서는 짧은 폭의 솔리톤 펄스를 얻을 수 있는 수동형 모드록킹 방식의 장점을 그대로 유지한 채 고반복률의 안정된 솔리톤 펄스열을 얻기 위하여, 수동형 모드록킹 방식의 '8'자 구조 광섬유 레이저에 재생형 위상 변조에 의한 조화 모드록킹을 적용하고 실험하였다. 재생형 위상 변조에 사용된 변조 주파수는 종모드간 맥놀이 스펙트럼 중에서 기본 모드록킹 주파수의 96차 고조파 성분에 해당되는 400 MHz를 추출하여 사용하였다. 실험 결과, 변조 신호에 따라 등간격으로 정렬된 안정된 솔리톤 펄스열을 얻을 수 있었으며, 공진기 내부의 위상 변조에도 불구하고 수동형 모드록킹시의 개개 펄스의 특성이 거의 유지됨을 확인할 수 있었다.

*E-mail: hgpark@phy0.chonbuk.ac.kr

이 연구는 한국과학재단 지정 광전자연구센터와 국방부 지정 전자광특화연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

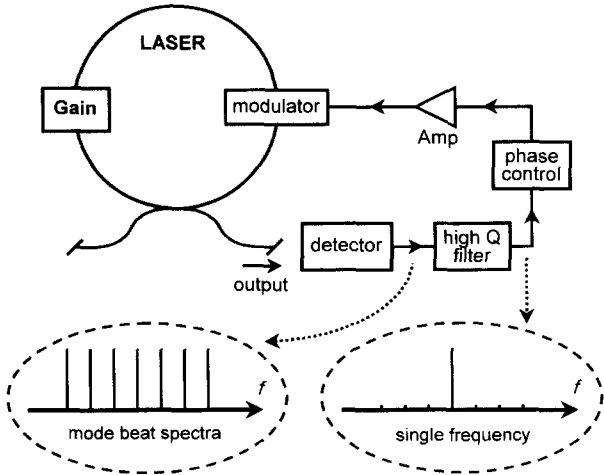


그림 1. 재생형 위상 변조에 의한 조화 모드록킹의 개념도.

II. 재생형 위상 변조에 의한 조화 모드록킹

재생형 변조에 의한 조화 모드록킹의 기본적 개념도를 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 모드록킹된 레이저의 펄스 출력은 공진기의 길이에 따른 공진기 순환 주기의 반복률을 갖는다. 이때 레이저의 종모드 스펙트럼간의 간격은 모드록킹된 펄스의 기본 반복률과 일치한다. 레이저 종모드간의 맥놀이 스펙트럼을 광검출기로 검출한 후, 높은 Q값의 필터를 사용하여 원하는 특정 고조파 성분을 추출한다. 이때 추출된 고조파 성분은 기본 모드록킹 주파수의 정수배에 해당되며, 이를 공진기 내부에 삽입된 위상 변조기를 구동하는데 사용한다. 추출된 사인파 형태의 고조파 성분은 공진기 내부를 순환하는 광펄스가 변조기를 지나는 동안 최적의 조건을 경험하도록 위상이 조절되고, 증폭기를 통하여 증폭된 후에 변조기에 구동 신호로 입사된다. 재생형 변조에 의해 조화 모드록킹된 레이저 펄스의 반복률은 변조 주파수와 일치하게 된다. 따라서 기본 모드록킹 주파수의 임의의 정수배에 해당되는 고조파 성분을 선택하여 추출함으로써 원하는 펄스 반복률을 얻을 수 있다.

한편, 공진기 내부의 위상 변조에 의해 펄스들이 변조 신호에 따라 동기화(synchronization)되고, 처핑(chirping) 방향에 따른 펄스의 압축과 확장 효과의 원리를 그림 2에 나타내었다. 위상 변조된 광펄스는 그림 2에서와 같이 펄스가 위상 변조기를 통과하는 시점에 주파수 상향 처핑(frequency up-chirping) 또는 하향 처핑(down-chirping)을 겪게 된다. 펄스가 하향 처핑된 경우(그림 2에서 C, D 구간내 위치), 광섬유 내부의 비정상 군속도 분산(anomalous group velocity dispersion, $dv_g/d\omega > 0$)에 의해 공진기를 왕복하는 동안 펄스폭은 점점 넓어지게 된다. 그리고 비정상 군속도 분산에 의해 유도된 처핑 또한 하향 처핑이므로 공진기를 순환하는 동안 하향 처핑된 펄스는 결국 퍼져서 소멸된다. 반면에 상향 처핑된 펄스의 경우(A, B 구간내 위치), 펄스의 주파수가 증가하는 영역(A)에서는 펄스의 군속도는 감소하게 되며, 주파수가 감소하는 영역(B)에서 펄스의 군속도는 증가하게 된다. 따라서 펄스가 공

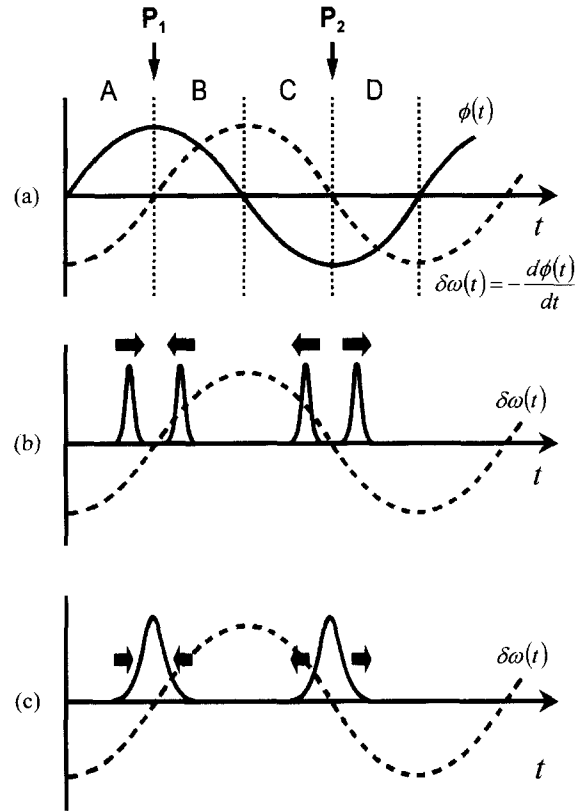


그림 2. 위상 변조에 의한 펄스의 변조 신호에 따른 동기화와 펄스 압축의 원리. (a) 변조위상 $\phi(t)$ (실선)와 주파수 변화량 $\delta\omega(t)$ (점선), (b) 변조 신호에 따른 펄스의 동기, (c) 처핑 방향에 따른 펄스 압축과 확장.

진기를 돌면서 위상 변조기를 반복적으로 통과하는 동안에 펄스는 주파수 변화량이 0이 되는, 즉, 위상 변조의 두 극대점(P_1, P_2) 중의 하나인 상향 처핑의 위치(P_1)에 동기화된다.

펄스의 세기가 충분히 크고 공진기의 길이가 충분한 경우 펄스는 자기 위상 변조(self-phase modulation)에 의한 상향 처핑을 겪게 된다. 자기 위상 변조에 의해 유도된 상향 처핑이 외부 위상 변조에 의해 보강되어 상향 처핑의 크기가 증가하게 되고 공진기 내에서 펄스의 압축 효과는 자기 위상 변조만에 의한 것보다 더욱 증가하게 된다. 따라서 이러한 위상 변조에 의해 펄스압축 효과가 증대되므로 외부 변조에도 불구하고 변환한계에 매우 근접한 솔리톤 펄스를 얻을 수 있다.

III. 실험

재생형 위상 변조에 의해 조화 모드록킹된 '8'자 구조 광섬유 레이저의 구성도를 그림 3에 나타내었다. '8'자 구조 광섬유 레이저는 비선형 loop mirror와 광 고립기가 포함된 단방향 loop로 구성되어 있다. 비선형 loop mirror는 영분산 파장이 $1.55 \mu\text{m}$ 인 약 20 m의 분산천이 광섬유와 광섬유 레이저의 이득매질로 사용되는 약 10 m의 erbium 첨가 광섬유로 구성되어 있다. 비선형 loop mirror 내에서 양방향으로 진행되는 두 빛이 서로 다른 광 power를 가진 상태에서 비선형 loop를 지날

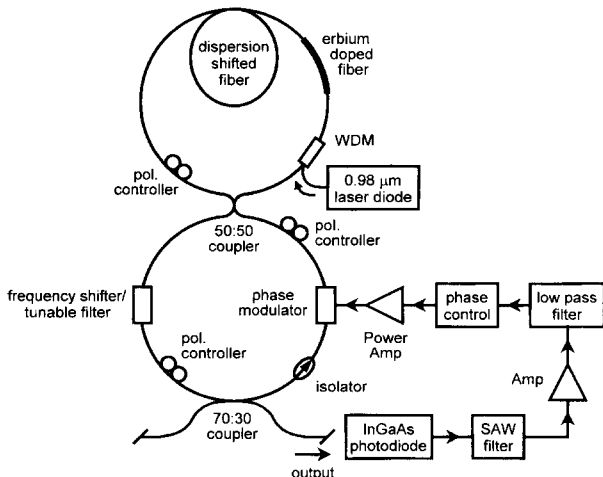


그림 3. 재생형 위상 변조에 의해 조화 모드록킹된 '8'자 구조 광섬유 레이저의 구성도.

수 있도록 erbium 첨가 광섬유를 비선형 loop 내에 비대칭적으로 두었다. 파장이 0.98 μm인 레이저 다이오드로부터의 펌핑광을 0.98/1.55 μm 파장 분할 다중화 소자를 통해 erbium 첨가 광섬유 내로 입사시켰다. 그리고 비선형 loop mirror 내의 복굴절 상태를 조절하기 위하여 편광 조절기를 두었다.

비선형 loop를 1.55 μm 파장에서 광 power 분배비율이 50:50인 방향성 광섬유 결합기를 사용하여 단방향 loop와 결합하였다. 단방향 loop 내에 광 고립기를 두어 비선형 loop mirror의 투과광이 레이저 공진기 내에서 단방향으로만 순환하도록 하였다. 또한 편광 조절기를 두어 공진기 내부의 고유 편광 상태를 조절할 수 있도록 하였다. 비선형 loop mirror를 포함한 광섬유 공진기의 전체길이는 약 48 m였다.

레이저 공진기 내에 이중모드 광섬유로 이루어진 광 주파수 변환기를 삽입하였다. 변환 주파수는 3.1 MHz이고, 삽입 손실은 대략 3 dB이다. 레이저 빛이 공진기를 순환할 때마다 한 방향으로 지속적인 주파수 이동이 일어나게 되어 연속발전 성분이 억제되고 상대적으로 펄스 발진을 선호하게 되며, 자기 시동 문턱치(self-starting threshold) 펌프 power를 연속 발전 성분의 수준까지 대폭 낮출 수 있었다.^[6] 또한 주파수 변환기는 40 nm 이상의 파장 범위에 걸쳐 약 14 nm 정도의 투과 대역폭을 갖는 가변 파장필터 기능도 가지고 있다.

70:30의 광 power 분배비율을 갖는 방향성 광섬유 결합기를 사용하여 레이저의 출력을 뽑아내었다. 공진기 전체 손실은 약 15 dB로 추정되었다. 레이저의 평균 출력은 120 mW 펌프 power에 대해 약 360 μW 수준이었다. 뽑아낸 레이저의 출력의 일부를 대역폭이 1 GHz인 InGaAs PIN photodiode를 사용하여 검출하였으며, 50:50의 분배비율을 갖는 power 분할기를 통해 둘로 나눈 후, 400 MHz에 해당하는 고조파 성분의 추출을 위해 surface acoustic wave (SAW) 필터로 입사되었다. 광검출기를 통해 검출된 광섬유 레이저의 모드간 맥놀이 스펙트럼으로부터 중심 주파수가 400.0 MHz이고, Q 인자가 대략 1000인 SAW 필터를 사용하여 모드록킹 기본 주파수인 4.2 MHz의 96차에 해당하는 고조파 성분을 추출하였으며, 추출

된 고조파 성분은 여러단의 전압 증폭기를 거쳐 증폭되었다. SAW 필터 전후의 임피던스 불일치에 의한 400 MHz 이상의 고주파 영역에서의 잡음 스펙트럼을 차단 주파수가 대략 400 MHz 근처인 저역투과 필터를 사용하여 제거하였다.

추출된 고조파 성분은 위상 변조기로 입사되기 전에 위상 조절기를 통해 적절한 위상 상태로 조절된 후, 35 dB의 이득을 갖는 전력 증폭기를 사용하여 증폭한 후 위상 변조기를 구동하는데 사용하였다. 위상 변조기의 삽입 손실은 1.55 μm 파장 대역에서 2.5 dB이고, 1 GHz의 대역폭, 그리고 400 MHz의 주파수에서 대략 6.6 Vpp의 반파 전압(half wave voltage)를 갖는다. 또한 위상 변조기는 편광 소멸비가 65 dB 이상으로서 편광기의 기능도 겸하고 있다.

Power 분할기를 통해 둘로 나뉘어진 광섬유 레이저의 출력을 오실로스코프와 RF 스펙트럼 분석기, 광스펙트럼 분석기를 통하여 관찰하였다. 사용되지 않은 방향성 광섬유 결합기의 단말 부분은 단면 반사광이 공진기 내로 역류하지 않도록 하기 위해 광섬유의 단면이 경사지게 연마된 광코드와 융착 접속(fusion splicing)하였다.

IV. 결과 및 논의

먼저 재생형 위상 변조에 의한 모드록킹을 하지 않은 경우 (위상 변조기를 구동하지 않은 경우) 본 실험에 사용된 '8'자 구조 광섬유 레이저의 일반적인 출력 패턴을 그림 4에 나타내었다. 광섬유 레이저의 출력을 InGaAs PIN photodiode로 검출한 후 오실로스코프와 RF 스펙트럼 분석기를 사용하여 관찰하였다. 그림 4(a)는 오실로스코프 파형을 나타낸 것으로 개개의 솔리톤 펄스들이 임의의 시간간격을 갖고 존재함을 알 수 있었다. 그러나 임의의 시간간격일지라도 개개의 펄스들이 펄스군을 이루어 공진기 순환주기와 일치하는 235 ns의 주기를 갖고 반복됨을 볼 수 있다. 이와 같이 재생형 변조에 의한 모드록킹을 하지 않은 경우 솔리톤 펄스간의 시간간격이 일정하지 않음을 알 수 있으며, 이는 광섬유 솔리톤 레이저의 전형적인 출력 형태이다.^[3,7] 한편, RF 스펙트럼 분석기의 파형을 그림 4(b)에 나타내었다. 왼쪽의 큰 peak는 dc 성분을 나타낸 것이며, 모드록킹 기본 주파수인 4.2 MHz에 해당하는 중모드 간격을 갖는 맥놀이 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

위상 변조기를 구동하기 위한 클럭을 추출하기 위해 중심 주파수가 400.0 MHz인 SAW 필터를 사용하여 모드록킹 기본 주파수의 96차에 해당하는 400 MHz의 고조파 성분을 추출하였다. 추출된 모드 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)의 오실로스코프 파형에서처럼 2.5 ns의 주기를 갖는 비교적 깨끗한 사인파를 얻을 수 있었다. 추출된 고조파 성분은 위상 변조기를 구동하기에는 전압의 크기가 작으므로 전압 증폭기와 전력 증폭기를 통하여 충분히 증폭한 후 사용하였다. 그림 5(b)에 추출된 고조파 성분의 RF 스펙트럼을 나타내었다. 왼쪽의 큰 peak는 dc 성분이고, 오른쪽은 약간 작은 peak는 400 MHz에 해당되는 모드 스펙트럼이다.

공진기 내부의 편광 조절기를 미세하게 조절함으로써 모드록킹된 펄스를 얻을 수 있는데, 이때 편광 조절기의 조절 상

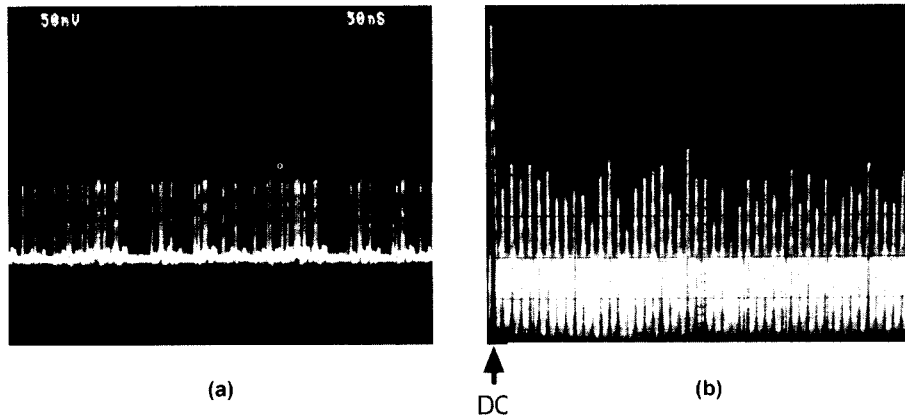


그림 4. 재생형 변조에 의해 조화 모드록킹 되지 않은 경우(위상 변조기를 구동하지 않은 경우) '8'자 구조 광섬유 솔리톤 레이저의 출력 특성. (a) 임의의 시간 간격을 갖는 솔리톤 펄스열 출력 (수평축 : 50 ns/div.), (b) 검출된 솔리톤 펄스열 출력의 RF 스펙트럼(수평축 : 20 MHz/div., 수직축 : 10 dB/div.).

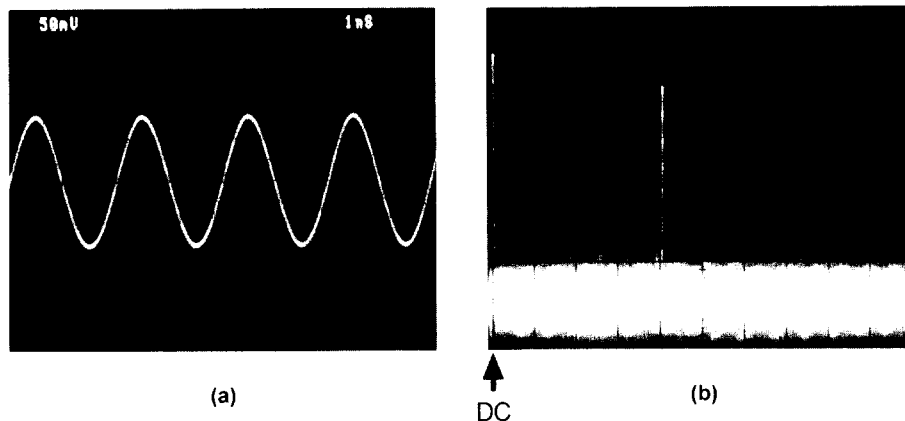


그림 5. 위상 변조기를 구동하기 위해 SAW 필터를 이용하여 추출한 400 MHz의 고조파 성분. (a) 주기가 2.5 ns인 사인파 (수평축 : 1 ns/div.), (b) 추출된 고조파 성분의 스펙트럼 (수평축 : 100 MHz/div., 수직축 : 10 dB/div.).

태에 따라 펄스들은 임의의 위상 상태로 발전하게 된다. 이러한 임의의 위상 상태를 갖는 펄스들이 위상 변조기를 통과할 때 펄스와 변조 신호 각각의 위상이 서로 상향 치평의 관계로 정합되기 위해, 추출된 고조파 성분이 위상 변조기에 입사되기 전에 위상 조절기를 지나게 함으로써 변조 신호의 위상을 적절하게 조절하였다. 변조 신호와 펄스의 위상이 일정한 관계로 정합되는 경우 공진기를 순환하는 펄스들은 최적의 위상 상태로 변조기를 지날 수 있게 된다. 이때 펄스들은 변조 신호와 동기화되어 일정한 시간 등간격으로 정렬된다.

변조기의 구동 전압이 대략 $7 V_{pp}$ 이상에서 재생형 변조에 의한 조화 모드록킹이 이루어졌으며, 이때 광섬유 레이저의 출력 펄스열을 오실로스코프와 RF 스펙트럼 분석기를 사용하여 관찰하였고, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)의 오실로스코프 파형에서와 같이 400 MHz의 변조 신호에 맞추어 시간 등간격으로 정렬된 솔리톤 펄스열을 얻을 수 있었으며, 시간 영역에서 펄스간의 간격은 2.5 ns로 나타났다. 아래의 사인파는 변조 신호를 나타낸 것이다. 솔리톤 펄스열과 변조 신호가 동기화 되어 있음을 알 수 있다. 그림 6(a)에서 펄스가 있어야 할 시간 위치에서 존재하지 않은 것(화살표

위치)은 펌프 power가 충분하지 않기 때문이다. 한편, RF 스펙트럼 분석기로 분석한 발전모드 특성을 그림 6(b)에 나타내었다. 왼쪽의 큰 peak는 dc 성분이며, 나머지 큰 peak들은 위상 변조기의 변조 주파수인 400 MHz로 조화 모드록킹된 레이저의 모드간 맥놀이 스펙트럼을 나타낸 것이다. 각각의 모드 스펙트럼의 간격은 400 MHz였다.

솔리톤 펄스가 아닌 경우에 펌프 power를 증가시키면 펄스의 진폭이 펌프 power에 따라 변하게 된다. 그러나 솔리톤 펄스의 경우에는 펄스의 진폭이 공진기내 분산의 크기에 따라 결정되고, 또한 양자화 되어 있으므로 펌프 power가 변하는 경우 공진기 내에서 진행되는 펄스의 수를 변화시킴으로써 펌프 power의 변화를 수용하게 된다. 펌프 power를 변화시키는 경우에 대한 광섬유 레이저의 펄스 패턴의 변화를 그림 7에 나타내었다. 솔리톤 펄스열의 진폭은 거의 변하지 않은 채, 솔리톤 펄스의 수가 증가함을 알 수 있었다. 펌프 power의 증가에 의해 솔리톤 펄스가 그림의 화살표 위치에 추가됨을 볼 수 있는데 그 경우 언제나 변조 신호와 동기화된 위치에 추가됨을 알 수 있다.

무배경 상관을 갖는 자기상관계와 오실로스코프를 사용하

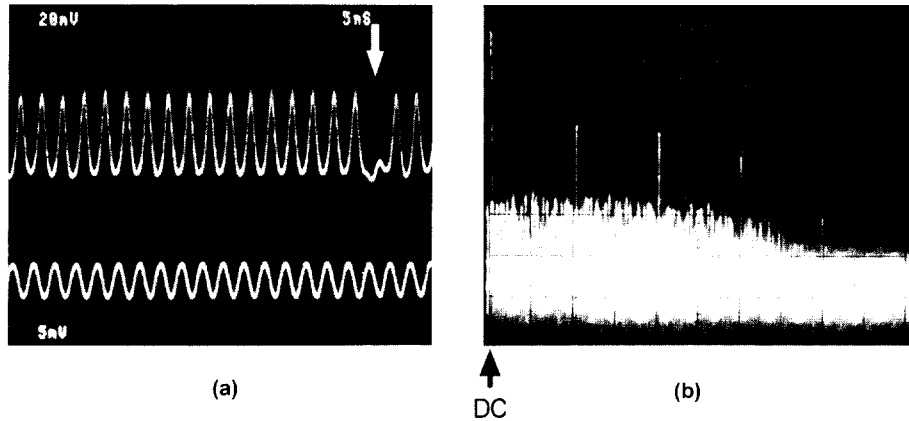


그림 6. 등간격으로 정렬된 재생형 변조에 의해 조화 모드록킹된 광섬유 솔리톤 레이저의 출력 패턴(위 파형)과 변조기 구동신호(아래 파형). (a) 변조 신호에 맞추어 정렬된 솔리톤 펄스열(수평축 : 5 ns/div.), (b) (a)에 대한 RF 스펙트럼(수평축 : 200 MHz/div., 수직축 : 10 dB/div.).

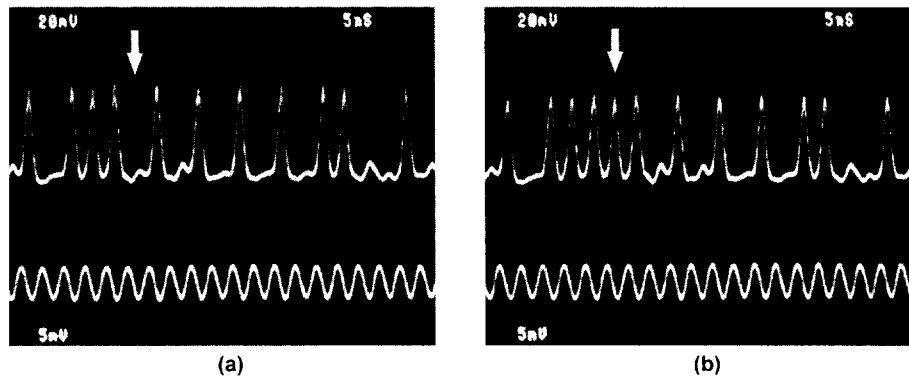


그림 7. 펌프 power를 (a)에서 (b)로 5 mW 증가시키는 경우의 펄스 패턴의 변화(수평축 : 5 ns/div.).

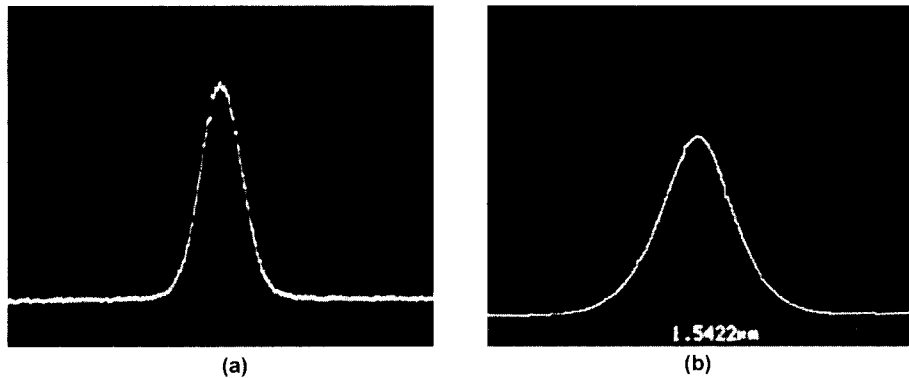


그림 8. 재생형 변조에 의한 조화 모드록킹에 의해 발생된 솔리톤 펄스의 특성. (a) 자기상관 파형(수평축 : 1.6 ps/div.), (b) 광 스펙트럼 파형(수평축 : 2 nm/div., 분해능 : 0.2 nm).

여 펄스폭을 측정하였고, 펄스폭 측정과 동시에 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 광 스펙트럼을 관찰한 후 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 자기상관 파형을 나타낸 것으로, 자기상관 파형의 반치폭은 1.44 ps로 측정되었다. 펄스의 모양을 sech^2 으로 가정하였을 때 실제 펄스폭은 930 fs로 나타났다. 광 스펙트럼은 그림 8(b)에 나타냈으며, 그 경우 중심파장은 1542 nm이며, 반치 파장선폭은 3.1 nm였다. 펄스폭과 주파수 대역폭의 곱은 0.359로써 솔리톤 펄스의 변환한계

(0.315)에 가깝기 때문에 처핑이 거의 존재하지 않음을 알 수 있었다.

한편, 재생형 위상 변조를 하지 않은 경우, 즉, 순수한 수동형 방식으로 모드록킹된 레이저의 경우에도 펄스폭은 935 fs로 거의 같은 결과를 얻었다. 이는 재생형 위상 변조에 의해 개개 솔리톤 펄스의 특성이 전혀 훼손되지 않았음을 보여준다. 외부 변조를 하는 경우에 펄스폭이 넓어지거나 변환한계로부터 멀어지는 경우가 많은데, 본 논문에서와 같이 재생형

위상 변조에 의한 조화 모드록킹 방식을 수동형 모드록킹 방식의 '8'자 구조 광섬유 레이저에 적용하는 경우에는 광섬유 내부에 존재하는 고유의 비정상 분산과 자기 위상 변조가 위상 변조에 의한 상향 처핑의 효과와 어우러져 수동형 모드록킹 방식에서의 짧은 펄스폭을 유지한 채 변환한계에 가까운 솔리톤 펄스를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

재생형 변조에 의한 모드록킹 방식의 외부 환경 변화에 대한 안정성을 시험하기 위하여 기존의 능동형 모드록킹 방식(공진기 길이를 자동 조절하지 않는 상태의)과 비교하였다. 신호 발생기를 사용하여 능동형 모드록킹이 잘 이루어지도록 400 MHz 근처에서 주파수를 미세하게 조절한 후, 위상 변조기에 RF 신호를 직접 인가하여 능동형 모드록킹이 이루어지는 경우 2.5 ns의 주기로 정렬된 솔리톤 펄스를 얻을 수 있었다. 일단 정렬된 솔리톤 펄스열은 1~2분 정도 시간이 경과한 후에 곧 detuning이 되었다. 그러나, 같은 실험 조건하에서 재생형 변조에 의한 모드록킹의 경우, 수시간 동안 2.5 ns의 주기로 안정된 펄스열을 발생시키는 것을 볼 수 있었다. 재생형 위상 변조에 의한 모드록킹을 광섬유 솔리톤 레이저에 적용하는 경우, 진동이나 온도 변화와 같은 외부 perturbation에도 불구하고 상당히 안정된 조화 모드록킹의 상태를 유지하였는데 이는 외부 환경 변화에 의한 공진기의 상태 변화가 언제나 위상 변조기의 구동 신호로 귀환됨으로써 외부 환경 변화에 의해 발생하는 공진기 길이의 변화를 수용할 수 있기 때문인 것으로 여겨진다.

V. 결 론

재생형 위상 변조에 의한 조화 모드록킹을 주파수 변환 귀환 방식의 '8'자 구조 광섬유 레이저에 적용하여 비교적 안정

된 고반복률의 솔리톤 펄스열을 얻을 수 있었다. 위상 변조에 사용된 주파수는 모드록킹 기본 주파수의 96차에 해당하는 400 MHz였다. 재생형 변조에 의해 조화 모드록킹이 시작되면 서로 임의의 시간간격으로 존재하던 솔리톤 펄스들이 변조 신호에 따라 정렬되었다. 각각의 솔리톤 펄스들은 변조 신호와 상향 처핑의 위상관계로 정합됨을 알 수 있었다. 재생형 변조를 이용한 조화 모드록킹을 시도하여 얻은 솔리톤 펄스의 펄스폭은 930 fs, 반치 파장선폭은 3.1 nm였다. 이때 펄스폭과 주파수의 대역폭의 곱은 0.359로서 처핑이 거의 없는 변환한계에 가까운 펄스임을 알 수 있었다. 또한 레이저 공진기 상태의 변화가 위상 변조기의 구동 신호로 귀환되어 변조 주파수가 레이저 종모드간 주파수 차이와 언제나 정확히 일치하므로 공진기 길이의 조절 없이도 외부 perturbation에 대해 안정적인 조화 모드록킹이 가능하였다.

참고문헌

- [1] J. D. Kafka, T. Baer, and D. W. Hall, *Opt. Lett.* **14**, 1269 (1989).
- [2] D. N. Payne, M. W. Phillips, and V. J. Matsas, *Electron. Lett.* **16**, 730 (1991).
- [3] D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne, V. J. Matsas, and M. W. Phillips, *Electron. Lett.* **27**, 1451 (1991).
- [4] X. Shan, D. Cleland, and A. Ellis, *Electron. Lett.* **28**, 182 (1992).
- [5] M. Nakazawa, E. Yoshida, and Y. Kimura, *Electron. Lett.* **30**, 1603 (1994).
- [6] Seung Chul Yun and Hee Gap Park, to be published in *J. Kor. Phys. Soc.*
- [7] Myoung Soo Lee and Hee Gap Park, *J. Kor. Phys. Soc.* **29**, 310 (1996).

Harmonic mode locking of 'Figure-of-Eight' fiber soliton laser using regenerative phase modulation

Seung Chul Yun and Hee Gap Park

Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

(Received October 12, 1998, Revised manuscript received February 19, 1999)

We demonstrated a harmonic mode locking scheme that used regenerative phase modulation to get a high and stable repetition rate in a figure-of-eight fiber soliton laser. From the detected beat spectra of the laser output, a sinusoidal clock frequency tone of 400 MHz, the 96th harmonics of the fundamental mode locking frequency, was extracted with a high Q filter and was used to drive the phase modulator, resulting in stable output of soliton pulse train synchronized with the modulation signal. Generated soliton pulses had FWHM pulsewidth of 930 fs and 3.1 nm linewidth, yielding pulsewidth-bandwidth product of 0.359 that was close to the transform limit. As the modulation frequency always followed the beat frequency of laser modes, stable harmonic mode locking was achieved without the adjustment of the cavity length, which has been commonly required in actively mode-locked lasers.