

## 초단펄스 광섬유 레이저



박 희 갑

전북대학교 물리학과

### 1. 서 론

광섬유는 광섬유 고유의 분산(dispersion)과 비선형성(nonlinearity)으로 인하여 femto초(fs)급 초단펄스의 압축과 성형에 유용한 도구로써 활용되어 왔다<sup>[1]</sup>. 또한 erbium이나 neodymium과 같은 희토류 능동매질이 첨가된 광섬유는 이제까지 광섬유가 지녀왔던 전송매체로서의 기능뿐 아니라 발광 기능까지도 가지게 되었다<sup>[2,3]</sup>. 따라서 이러한 능동매질이 첨가된 광섬유를 이득매질로 이용하여 레이저를 만들면 fs급의 초단펄스 광원을 구성할 수 있다. 광섬유 레이저로써 초단펄스를 얻는 방법은 주로 모드록킹(mode locking)에 의존하는데, 많은 경우에 공진기 광섬유 내에서 솔리톤 펄스가 형성되는 것을 이용한다<sup>[4]</sup>. 솔리톤이란 광섬유내에서 분산에 의한 광펄스의 퍼짐이 비선형 광학효과에 의해 보상되어 먼거리를 퍼짐없이 진행할 수 있는 펄스를 의미한다. 이때 고차 솔리톤의 경우에는 펄스가 주기적으로 압축과 확장을 반복하는데 이 효과를 이용하여 극도로 압축된 매우 짧은 펄스를 얻을 수 있다.

광섬유 레이저를 이용한 초단펄스 발생에 관한 연구<sup>[5-26]</sup>는 주로 광통신에 의해 동기가 유발되었다. 광섬유 레이저의 출력 단말은 광섬유 상태이므로 전송용 광섬유와의 접속이 자연스러우며 결합손실을 최소화 할 수 있다. 광섬유 내에는 펄스 생성과 압축에 필요한 모든 요소들, 즉, 광이득, 분산, 비선형성의 세가지 요소가 함께 있으므로 별도의 펄스 압축 과정을 거치지 않더라도 효율적으로 짧은 펄스 출력을 얻을 수 있으며, 필요한 분산과 비선형성의 크기도 광섬유 길이로써 조절할 수 있다. 이러한 장점들로 인하여 모드록킹된 광섬유 레이저는 차세대 광통신 방식인 광솔리톤 전송 시스템의 유망한 광원으로 기대되어 최근에 많은 연구와 진보가 이루어졌다. 그 결과 100 fs 이하의 펄스폭<sup>[5]</sup>과 20 GHz 이상의 반복률<sup>[6]</sup>을 얻고 있으며, 광섬유 레이저의 출력을 광섬유 증폭기를 거쳐 30 fs까지 압축

시킨 결과<sup>[7]</sup>가 보고된 바 있다. 초단펄스의 광섬유 레이저 출력을 능동 광섬유로써 다시 압축, 증폭하는 방식은 빛이 광섬유를 일체 떠나지 않는 all-fiber 방식이므로 광통신에서 매우 큰 장점이 된다.

광섬유 레이저의 모드록킹 방식은 능동형과 수동형으로 대별된다. 광섬유 레이저의 능동형 모드록킹은 다른 종류 레이저의 능동 모드록킹과 같은 원리이나, 차이점은 펄스가 공진기 광섬유를 따라 진행하면서 비선형 효과로 인하여 모양과 폭이 변화한다는 점이다. 그리고 공진기 길이가 매우 길어서 외부 변조주기와 맞추어 주기 위해 길이의 안정화가 반드시 필요하다. 또한 능동 모드록킹에 의해 얻을 수 있는 펄스폭은 ps급으로 비교적 넓다. 그러나 능동 모드록킹의 장점은 무엇보다도 외부로부터 가해지는 전기 신호에 따라 변조되므로 펄스 주기에 대해 제어 가능한 전기적 reference가 존재한다는 점이다. 따라서 수동 모드록킹에 비해 펄스들간의 jitter와 noise가 비교적 적고 통신 시스템에서의 적용이 보다 용이할 것으로 보인다.

한편, 수동형 모드록킹은 능동형 모드록킹에 비하여 훨씬 짧은 폭의 펄스를 얻을 수 있다. 이 방식은 구성이 단순하고 all-fiber에 가깝다는 장점이 있다. 광섬유 레이저의 수동형 모드록킹은 두가지 부류로 나누어 생각할 수 있다. 하나는 광섬유 내에서의 광학적 Kerr 효과를 이용하여 펄스를 발생시키는 방법이다. 매질의 굴절률(n)은 빛의 세기(I)에 따라  $n=n_0+n_2 I$ 의 꼴로 변화하며, 또한 복굴절(birefringence)도 빛의 세기에 따라 변화한다. 이러한 Kerr 효과를 이용하여 펄스를 얻기 위한 공진기 구성 방식에는 nonlinear loop mirror 방식과 nonlinear polarization rotation을 이용하는 방식이 있다. 수동 모드록킹의 또 다른 부류는 공진기 내에 반도체나 dye와 같은 포화 흡수체를 사용하는 방식이다. 응답속도가 빠른 포화흡수 매질을 사용하는 수동 모드록킹은 다른 종류의 고체 레이저의 경우와 원리가 흡사하므로 여기서 자세히 다루지는 않을 것이다. 어느 부

류의 수동 모드록킹이든지 긴 광섬유 공진기 내에서 비선형 효과로 인해 펄스폭이 압축되는 효과를 이용하는 경우가 많다.

이와 같이 열거한 여러 가지 모드록킹 방식에 대해 동작원리와 기술현황, 그리고 펄스압축, 반복률 제어, 안정화 등 몇가지 기술적으로 중요한 사항에 대해 설명하고자 한다.

## 2. 수동형 모드록킹

### 2.1. Nonlinear Amplifying Loop Mirror 방식

Nonlinear amplifying loop mirror(NALM) 방식<sup>[8]</sup>의 광섬유 레이저 개념도를 그림 1에 나타내었다. NALM은 광섬유로 이루어진 Sagnac loop 내의 한쪽 끝에 비대칭적으로 광증폭기를 두어 loop를 서로 반대 방향으로 도는 두 빛간에 세기 차이가 있도록 함으로써 비선형적 위상차가 생기도록 한 것이다. 그림 1에서 loop 내에는 양방향으로 도는 빛간의 위상차를 유도하기 위해 비교적 긴 길이의 광섬유와 함께 loop의 한쪽 끝에 광증폭기가 포함되어 있다. NALM의 입력단으로 빛이 입사하면 50:50의 광 power 분배비율을 가지는 방향성 결합기에서 나뉘어진다. 나뉘어진 두 빛은 각기 반대 방향으로 loop를 돈 후 방향성 결합기에 의해 다시 합쳐지는데, 출력단에서 두 빛간의 위상차에 따라 간섭하여 투과율이 변화하게 된다. 일반적으로 방향성 결합기에서 coupling 될 때  $\pi/2$ 의 위상변화가 있으므로

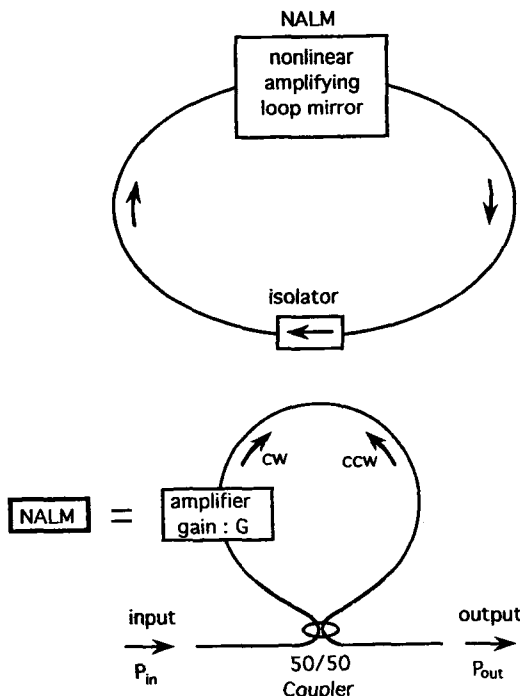


그림 1. Nonlinear amplifying loop mirror와 이를 이용하는 광섬유 레이저의 개념도.

양방향으로 돈 빛이 방향성 결합기의 출력단에서 만날 때 기본적으로  $\pi$ 의 위상차가 있게 된다.

그런데 loop를 시계 방향(CW)으로 도는 빛은 먼저 광증폭기에서 증폭된 후 높은 power로 loop를 지나게 되며, 반시계 방향(CCW)으로 도는 빛은 낮은 power로 loop를 돈 후에 비로소 증폭된다. 즉, 양방향으로 도는 두 빛의 세기가 서로 달라서 광학적 Kerr 효과에 의한 위상 변화가 양방향간에 서로 다른 크기로 유도되므로  $\pi$ 의 위상차 외에 빛의 세기 차이에 따른 위상차가 추가된다. 입력광 power가 작은 경우에는 양방향간의 빛의 세기 차이가 작아서 비선형 효과에 의해 유도된 위상차를 거의 무시할 수 있으므로 NALM은 거의 0의 투과율을 나타낸다. 그러나 입력광 power가 큰 경우에는 추가된 비선형 위상차에 대해 투과율이 sine 함수꼴로 증가하게 된다. 이러한 NALM으로 그림 1과 같이 링 레이저를 구성하는 경우에 낮은 power level의 dc 성분은 감쇠되고, noise spike와 같이 peak power가 큰 펄스는 상대적으로 낮은 손실을 겪으며 공진기를 순환할 수 있다. 따라서 이 레이저는 펄스 동작을 선호하게 된다. 또한 한 펄스 내에서도 낮은 power의 wing 부분이 peak 부분보다 투과율이 낮으므로 loop mirror를 통과할 때마다 펄스폭이 줄어드는 효과가 있게 된다. 그러나 무한정 줄어 들 수는 없는데 그 이유는 짧은 펄스의 경우에 스펙트럼 폭이 넓으므로 분산으로 인하여 광섬유를 따라 진행하면서 점차 펄스폭이 넓어지기 때문이다. 그런데 음의 군속도 분산을 나타내는 파장영역에서는(펄스가 적정한 에너지와 폭을 가지는 경우에) 비선형 광학 현상의 하나인 자기위상 변조(self-phase modulation) 효과와 분산효과가 함께 어우러져 분산으로 인한 펄스의 퍼짐이 완전히 상쇄될 수 있다. 이처럼 분산매질 내에서도 퍼짐없이 안정하게 진행할 수 있는 펄스를 솔리톤이라 한다. 이와 같은 조건을 만족하여 일단 솔리톤이 형성되면 짧은 펄스폭을 유지한 채 긴 길이의 공진기를 순환할 수 있게 된다.

NALM을 이용하는 수동형 모드록킹의 대표적인 예가 그림 2와 같은 소위 '8자 구조(figure of eight)의 광섬유 레이저이다<sup>[9-11]</sup>. 그림 2에서 '8자 모양의 위쪽 loop는 NALM이며, 아랫 부분은 광 isolator를 포함하는 단방향성 loop로서 NALM이 투과형으로 동작하도록 하여 실질적으로 링 구조의 공진기를 이루고 있다. NALM 내의 한쪽 끝에 erbium 첨가 광섬유 증폭기가 있으며 비선형 위상차를 유도하기 위한 수십~수백 m 정도 길이의 광섬유가 포함된다.

NALM과 isolator loop 내에 각각 편광 조절기가 있는데 이는 편광 상태를 조절할 뿐 아니라 loop를 양방향으로 돈 두 빛간의 위상차 bias를 변화시켜 효과적으로 펄스발진이 시작될 수 있도록 한다. 편광 조절기의 조절 상태에 따라 여러 가지 형

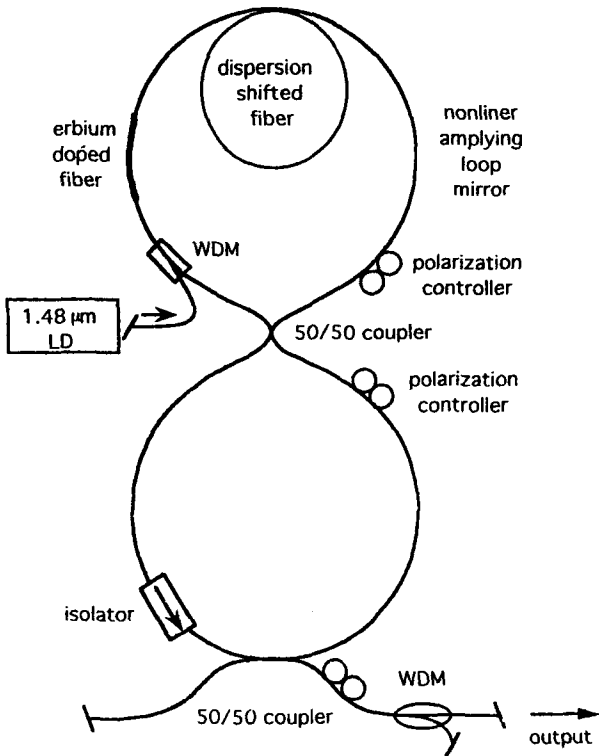


그림 2. Nonlinear amplifying loop mirror 방식의 '8'자 구조 광섬유 레이저.

태의 펄스 출력 패턴을 얻을 수 있는데, 그 중에서 솔리톤 펄스는 그림 3과 같이 많은 펄스가 임의의 간격으로 밀집된 펄스군의 형태로 나타난다. 임의의 간격이라 할지라도 동일한 펄스 패턴이 공진기 순환주기와 같은 일정주기로 반복되는데, 특징적인 것은 펄스 에너지가 양자화되어 있다는 점이다. 펄스 에너지가 양자화되어 있으므로 펌프 power가 증가하더라도 개개 펄스의 에너지는 어느 이상 증가하지 않고 단지 펄스의 수가

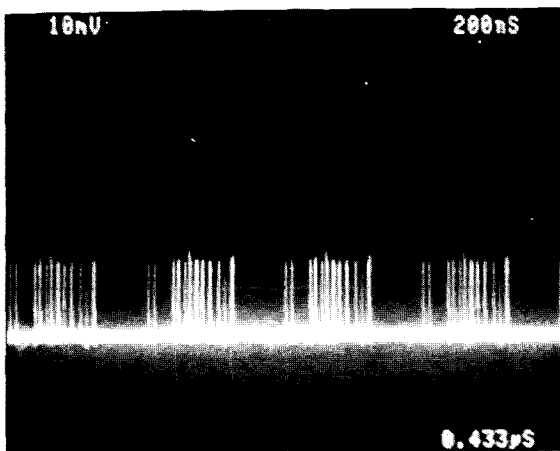


그림 3. '8'자 구조 광섬유 레이저의 솔리톤 펄스 출력의 전형적 패턴.

증가할 뿐이다. 따라서 솔리톤 펄스의 peak power를 높이려면 공진기 길이를 변화시켜야 한다. 이와 같이 양자화된 펄스 에너지와 임의의 간격의 펄스 패턴은 수동형 모드록킹된 광섬유 레이저에서 발생하는 솔리톤 펄스의 전형적 형태이다. 최저차의 솔리톤 펄스의 경우에  $\text{sech}^2$  함수꼴의 envelope 파형을 가지는데, 이상적인 경우에 transform limit에서 펄스폭과 주파수 대역폭의 곱은 0.315이다.

## 2.2. Nonlinear Polarization Rotation 방식

앞의 NALM의 경우에 입력광의 세기에 따라 양방향으로 진행하는 빛 간의 위상차가 변화하는 점을 이용하였다. 반면에 nonlinear polarization rotation(NPR) 방식<sup>[12]</sup>에서는 입력광의 세기에 따라 광섬유 복굴절의 크기가 달라져서 출력 편광 상태가 변화하는 점을 이용한다. 이 현상을 이해하기 위해 그림 4와 같이 선편광된 빛이 광섬유에 입사하는 경우를 생각해 보자. 일반적으로 광섬유에는 복굴절이 존재하는데 그 고유축을 각각 x, y축이라 하자. 이 복굴절의 크기에 따라 출사광은 일반적으로 타원편광되어 있다. 그런데 입사광의 세기가 매우 커지면 광학적 Kerr효과에 의해 굴절률이 증가하는데 두 고유축 방향의 편광성분이 각기 다르게 증가한다. 즉, 선형 복굴절외에 빛의 세기에 의존하는 비선형 복굴절이 유도되어 추가된다.

그림 4에서 입사광 power가 작은 경우에 선형복굴절에 의해 타원편광된 빛이 나온다. 그런데 입사광 power가 커지면 비선형 복굴절이 추가되어 출사광의 편광상태가 달라진다. 만일 출사단에서 검광기를 통해 빛을 검출할 때에 검광기의 투과축 방향이 점선방향이 되도록 하면 낮은 power의 빛은 거의 차단되

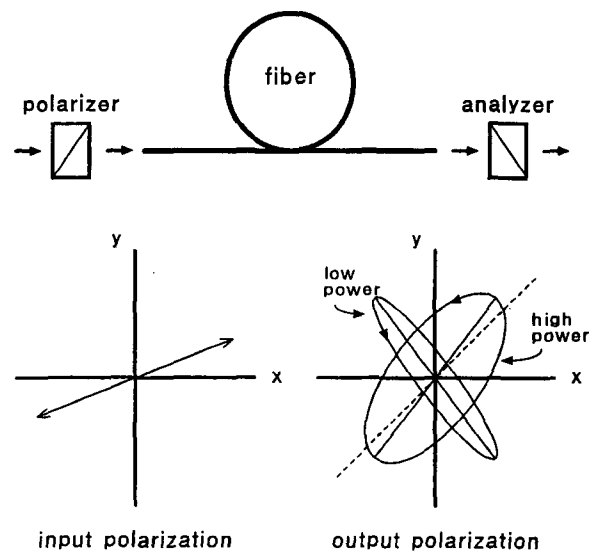


그림 4. Nonlinear polarization rotation.

고 높은 power의 빛 만이 주로 투과될 것이다. 즉, NALM의 경우와 마찬가지로 높은 peak power의 펄스가 낮은 power level의 dc 성분에 비해 높은 투과율을 가지게 된다. 또한 한 펄스 내에서도 peak 부분이 wing 부분보다 투과율이 높아 펄스성형 (shaping)이 이루어지고 폭이 좁아지는 효과를 얻게 된다. 레이저 공진기가 이처럼 빛의 세기에 의존하는 투과율을 가진 요소를 포함하면 펄스동작이 가능하고 적정조건을 만족시켜주면 모드록킹이 이루어진다.

이러한 NPR 현상을 이용하여 펄스 발진시킨 첫 번째 실험은 neodymium 광섬유를 이득 매질로 하여 Fabry-Perot 선형 공진기에서 행해졌다<sup>[12]</sup>. 공진기 내의 분산을 두쌍의 프리즘을 이용하여 보상하는 방법으로 짧은 펄스를 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 레이저는 스스로 펄스동작이 시작되지 않으므로 공진기 내에 별도의 변조기를 구동하거나 거울을 진동시켜야 했다. 그 후 거의 all-fiber로 구성된 erbium 첨가 광섬유 링 레이저에 이 원리가 적용되었는데<sup>[13]</sup> 기본적 구조는 그림 5과 같이 외견상 매우 단순한 형태로 되어 있다. 링 공진기 내에 한 방향으로만 발진이 일어나도록 isolator를 사용하는데, 대부분의 실험에서 편광 상태에 따라 투과율이 다른 isolator를 사용함으로써 실질적으로 편광기의 역할도 겸하도록 되어 있다. 또한 편광기/isolator의 앞뒤에 편광조절기들이 있는데, 비선형 매질에 입사하는 편광 상태와 출사편광 상태를 조절하여 펄스 성분만이 편광기를 투과할 수 있도록 한다. 이러한 광섬유 링 레이저는 외부 변조나 자극없이 스스로 펄스 시동이 가능하며, 출력펄스 특성은 앞의 NALM 방식의 '8'자 레이저의 경우와 매우 유사하다.

### 2.3. Frequency-Shifted Feedback

레이저 공진기 내에 광 주파수 변환기(frequency shifter)를 두어 레이저광이 공진기를 왕복(또는 순환)할 때마다 주파수를 한방향으로 이동시키는 frequency-shifted feedback(FSFB)의 방

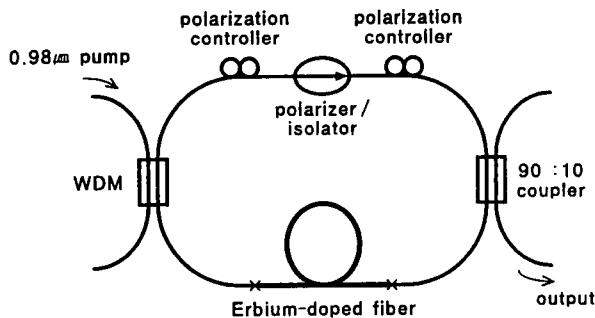


그림 5. Nonlinear polarization rotation을 이용하는 광섬유 링 레이저.

법으로 레이저를 펄스 동작시킬 수 있다<sup>[14]</sup>. 공진기 내에서 지속적으로 주파수 이동이 일어나면 레이저는 정상적인 종모드 발진이 억제되고, 대신에 종모드 구조가 없는 연속적인 넓은 대역폭의 증폭된 자연 방출광 출력을 낼 뿐이다. 그런데 공진기 내에 비선형성이 포함되면 사정이 달라진다. 연속발진 성분의 경우에 이득대역의 한쪽 끝으로 주파수가 일반적으로 밀려가 이득이 손실보다 작은 상태에 있다. 반면에, 순간 power가 큰 펄스 성분은 자기위상 변조로 인하여 새로운 스펙트럼을 만들어내는데 이득이 손실보다 큰 주파수 영역 쪽으로도 새로운 스펙트럼 성분을 계속 공급해 나가므로 연속발진 성분에 비해 상대적으로 작은 손실을 겪게 된다. 따라서 FSFB와 공진기의 비선형성이 함께 작용하여 이 레이저는 연속발진이 억제되고 펄스로 발진하게 된다.

이러한 FSFB의 원리가 고체 레이저의 모드록킹에 이용되었으며<sup>[14]</sup>, 이후 광섬유 레이저에도 적용되었으나<sup>[15]</sup> 펄스폭은 수~수십 ps에 불과하였다. 그러나 이 방식을 앞에서 설명한 NALM 방식의 '8'자 구조 레이저나 NPR 방식의 링 레이저에 적용할 경우에 두 방식의 장점을 고루 갖춘 좋은 특성을 얻을 수 있다<sup>[16]</sup>. 예를 들어 '8'자 레이저 공진기 내에 frequency shifter를 넣어 동작시키는 경우에, '8'자 레이저의 짧은 펄스폭의 장점을 그대로 유지하면서 펄스 시동을 위해 요구되는 펄스 power가 대폭 낮아진다. 또한, 외부 perturbation에 대한 펄스의 안정도도 크게 향상됨을 관찰할 수 있었는데 이와 같은 특성의 개선은 FSFB에 의해 연속발진이 억제되기 때문인 것으로 설명이 가능하다. 최근에는 삽입손실이 거의 무시할 수 있을 정도로 작은 all-fiber 형태의 주파수 변환기가 개발되어 이를 '8'자 구조 또는 링 구조의 수동 모드록킹된 광섬유 레이저에 적용함으로써 좋은 특성의 결과를 얻고 있다.

### 3. 능동형 모드록킹

서론에서 언급한 바와 같이 능동 모드록킹의 장점은 펄스폭 보다는 펄스 제어를 가능케 하는 전기적 reference가 존재한다는 데 있다. 이를 통해 안정된 높은 반복률을 얻을 수 있고 통신 시스템에 응용이 보다 용이할 수 있다는 장점이 있다.

광섬유 레이저 공진기내 변조 소자로는 LiNbO<sub>3</sub> waveguide modulator가 주로 사용되나, 반도체 광증폭기를 전류 주입으로 변조하여 모드록킹시킨 예도 보고되었다<sup>[17]</sup>. 이 경우에 위상변조와 진폭변조가 함께 일어나며 약간의 이득도 얻을 수 있다. 반도체 증폭기에서 구동전류 때문에 발생하는 chirping과 이득 포화에 의한 문제점은 광섬유 공진기 분산의 크기를 잘 조절함으로써 해결할 수 있다. 또한 반도체 광증폭기를 nonlinear

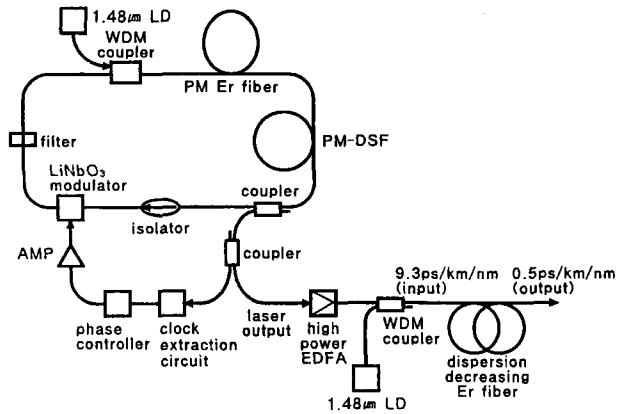


그림 6. 20 GHz로 능동 모드록킹된 광섬유 레이저와 분산감소형 Er 광섬유를 이용한 광펄스의 압축.

loop mirror 방식과 함께 시도한 예도 있다<sup>[18]</sup>.

순수한 능동 모드록킹만으로 얻을 수 있는 펄스폭은 수십 ps에 불과하나 많은 경우에 공진기 내에서 솔리톤 효과에 의한 펄스 압축이나 nonlinear polarization rotation과 같은 비선형 현상이 함께 일어나므로 경우에 따라서는 1ps 이하의 폭까지 얻고 있다.

모드록킹된 광섬유 레이저를 고속 통신 시스템에 응용하기 위해서는 짧은 펄스폭 뿐만 아니라 GHz급의 고반복률을 함께 얻는 것이 매우 중요하다. 이러한 관점에서 고반복률로 안정된 짧은 펄스 출력을 얻기 위한 실험의 예를 그림 6에 나타내었다<sup>[6]</sup>. 그림과 같이 erbium 첨가 광섬유 레이저 공진기 내에 LiNbO<sub>3</sub> 진폭 변조기로 능동 모드록킹하였다. 공진기내에 변조소자로서 LiNbO<sub>3</sub> 진폭변조기를 사용하였다. 변조기의 구동방법을 살펴보면, 레이저 출력의 일부를 뽑아내어 이 레이저 종모드간의 고조파 beat 중의 하나인 20GHz 부근의 beat를 검출한 뒤, 이를 clock 추출 회로에 넣어 안정된 clock 신호를 얻고 이로서 LiNbO<sub>3</sub> 변조기를 구동하였다. 레이저 종모드간 beat로부터 뽑아낸 신호로 변조기를 구동하므로 clock 신호가 언제나 공진기 변화를 따라가게 되어 안정된 모드록킹이 가능하게 된다. 이 방법으로 레이저의 출력단에서 20GHz로 반복되는 1.8ps 폭의 펄스대열을 얻었다. 또한 레이저 출력 펄스를 다시 분산감소형(dispersion-decreasing) erbium 첨가 광섬유로 증폭시키면서 증폭과 함께 172fs의 폭으로 압축시켰다. 이 실험은 모드록킹된 광섬유 레이저를 초고속 통신 시스템에 응용하는데 실질적으로 가장 접근한 예라고 할 수 있다.

능동 모드록킹에서 기술적으로 문제가 되는 것은 광섬유 공진기 길이가 길고, 온도 변화에 민감하여 공진기 왕복 주파수와 변조 주파수를 일치시키는 것이다. 대개 변조기 구동신호와 모드록킹된 레이저 출력 펄스간의 위상차로부터 오차신호(error

signal)를 얻어 이를 PZT와 같은 소자를 이용하여 공진기 길이 변화로 귀환시키는 방법을 사용한다. 그런데 공진기 길이 조절을 위해 금속으로 코팅된 광섬유를 사용하는 방법이 제안되었다. 광섬유의 금속 코팅 부분에 전류를 흘려 가열함으로써 길이 변화를 유도하여 거의 완벽하게 공진기 길이를 안정화시킬 수 있었다<sup>[19]</sup>. 또한 온도나 외부자극에 의한 광섬유내 편광 변화도 문제가 되는데 이점에 대해서는 증폭용 광섬유를 포함하여 공진기 전체를 편광유지 광섬유로 구성함으로써 해결할 수 있다.

#### 4. 펄스 압축, 반복률 제어 및 안정화

광펄스 압축의 잘 알려진 방법은 광섬유 내의 비선형 현상을 이용하여 스펙트럼 폭을 충분히 넓힌 후 광섬유 밖에서 회절격자 쌍이나 프리즘 쌍을 이용하여 압축하는 방식이다. 이 방법으로 색소레이저 펄스를 6fs까지 압축시킨 기록이 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 이 방법은 광섬유 레이저의 경우에 빛이 일단 광섬유를 빠져 나와야 하므로 광섬유 레이저의 장점이 퇴색된다. 따라서 여기서는 빛이 광섬유를 벗어나지 않은 상태에서 가능한 펄스 압축 방법에 대해서만 설명하기로 한다.

한가지 방법은 광섬유 레이저의 펄스 출력을 광섬유 증폭기로 증폭시키고 적당한 길이의 광섬유를 통과시키는 방법이다. 증폭에 의해 펄스 에너지가 솔리톤 유지에 필요한 이상이 되면 펄스가 스스로 모양을 변화시켜 나가는 성질을 이용하는 것인데 이 방법으로 30fs까지 압축시킨 결과가 보고되어 있다<sup>[7]</sup>. 한편, 출력단에서 분산감소형 광섬유(dispersion-decreasing fiber)를 사용하여 3.5ps의 펄스를 115fs까지 압축시킨 예도 있으며<sup>[20]</sup>, 아예 분산 감소형으로 만들어진 erbium 첨가 광섬유를 출력단에서 사용하여 능동 모드록킹된 1.8ps의 펄스를 증폭 압축시킨 예를 앞에서 보았다<sup>[6]</sup>.

또 다른 방법은 펄스가 공진기 광섬유를 따라 진행하면서 모양이 변화하므로 펄스의 폭이 레이저 공진기 내에서의 위치에 따라 다른 점을 이용한다. 공진기 내에서 출력을 뽑기 위한 방향성 결합기의 위치를 펄스폭이 최소가 되는 곳으로 선택함으로써 실질적으로 압축된 펄스 출력을 얻을 수 있다. 이 방법으로 '8'자 레이저로부터 별도의 외부에서의 압축 없이 내부 압축만으로 98fs의 펄스를 얻은 결과가 있다<sup>[5]</sup>. 공진기 내의 분산을 잘 조절하면, 예를 들어 음의 군속도 분산과 양의 군속도 분산을 가지는 광섬유들을 조합하여 공진기 구성을 최적화하면 펄스폭이 공진기내 특정 위치에서 최소가 되도록 만들 수 있다.

한편, 수동형 모드록킹에서 가장 큰 문제점은 펄스의 반복률이 불안정하다는 점이다. 능동 모드록킹과 달리 수동 모드록킹에서는 공진기내에서 펄스들 간의 상대위치를 규제할 수 있는

방법이 없으므로 공진기 내에 동시에 여러개의 펄스가 임의의 간격으로 존재할 수 있다. 그런데 대부분의 응용분야에서 고반복률로 등간격으로 나오는 초단펄스를 요구하는 경우가 많다. 모드록킹의 기본 주파수는 일정하므로 가능하다면 기본 주파수의 배수로 등시간 간격의 펄스가 나오도록 하는 harmonic mode locking을 시키는 것이 바람직하다. Harmonic mode locking을 위해서 '8'자 레이저에 작은 링 형태의 부공진기를 추가하는 방법이 시도된 예가 있다<sup>[21]</sup>. 기본 주파수의 38배의 harmonic 주파수로 일정 간격의 펄스를 얻을 수 있었으나, 부공진기의 길이를 주공진기 길이의 정수분의 일로 잘 맞추어야 하며 일종의 결합된 간섭계이므로 위상에 따라 매우 예민한 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 역시 '8'자 레이저에서 loop mirror를 투과하지 못하고 반사된 빛의 일부를 공진기로 귀환시키는 방법이 제안되었다<sup>[22]</sup>. 귀환광의 지연시간을 미세 조절함으로써 공진기내에서 펄스들이 등간격이 되도록 할 수 있다. 이 방법은 간섭적인 방법이 아니므로 앞의 방법에 비해 용이하게 실험이 가능한 장점이 있다. 이 밖에도 여러 가지 harmonic mode locking 방법들이 제안되었다<sup>[23-25]</sup>.

초단펄스 광섬유 레이저를 실용화하는데 또 다른 문제점은 온도 변화나 진동 등과 같은 외부 환경 변화에 대해 안정성이 떨어진다는 점이다. 특히 수동 모드록킹의 경우에는 외부 자극에 쉽게 펄스 동작이 중지되거나 불안정한 경우가 많은데 이때마다 재조정이 필요하다면 실용성 면에서 문제가 있다고 할 수 있을 것이다. 수동 모드록킹의 경우에 능동 모드록킹의 경우와는 달리 길이 변화에 대한 불안정성은 상대적으로 적으며 주로 편광 변화에 의해 불안정해지기 쉽다. 편광 안정성 문제 해결을 위한 두가지의 접근 방식이 있다. 우선 편광이 유지되지 않는 광섬유로 공진기를 구성하는 경우에, 공진기 내에서 Faraday rotating mirror(FRM)를 적절히 사용하면 선형 복굴절 변화에 의한 편광 변화를 보상할 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>[26]</sup>. 그러나 비선형 효과에 대해서는 보상 효과가 없어서 근본적인 해결책이 될 수 없는 것으로 보인다.

편광 변화의 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 방법은 공진기 전체를 모두 편광유지형으로 구성하는 것이다<sup>[27]</sup>. 실제로 이런 방법으로 구성되어 장기간 조정이 필요없고 상당한 ruggedness를 가지며 소형인 fs급의 광섬유 레이저 시제품들이 최근에 나오기 시작했다.

## 5. 결 론

광섬유 레이저의 모드록킹이 연구되어온 지난 10년 미만의 짧은 기간 동안에 괄목할 만한 연구 성과가 있었다. 현재 레이

저 직접 출력으로 100fs 이하의 펄스폭, 또는 20GHz 이상의 안정된 반복률을 가지는 결과들이 발표되었고, 통신 시스템에 의 응용도 시도되고 있다. 초단펄스 광섬유 레이저는 고반복률의 짧은 펄스를 쉽게 얻을 수 있는 점 외에도 반도체 레이저로 펄핑되므로 소형으로 구성할 수 있다는 점과 출력단말이 광섬유라는 점에서 광통신 시스템을 비롯한 여러 분야에의 응용이 기대된다. 흔히 단점으로서 다른 종류의 펄스 레이저에 비해서 펄스 에너지가 비교적 작고, 외부 perturbation에 대한 안정도가 떨어지며, 반복률의 제어가 쉽지 않은 점들이 지적되어 왔다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 문제점들이 속속 해결되어가고 있고 이미 상당한 ruggedness를 지닌 fs급 초단펄스 광섬유 레이저 시제품들이 나오고 있는 단계에 있다. 광섬유 레이저의 본격적 실용화를 위해서는 앞으로 보다 실용적인 harmonic mode locking 방법과 펄스 안정화 제어기술의 개발이 이루어져야 할 것이다. 한편 광섬유 레이저 모드록킹에 의한 극초단 펄스의 생성과 전파는 응용 목적으로서 뿐만 아니라 그 자체만으로도 물리적으로 매우 흥미로운 현상이 많아서 연구의 가치가 충분히 있는 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becher, and C. V. Shank, *Opt. Lett.* **12**, 483 (1987).
2. S. B. Poole, D. N. Payne, and M. E. Fermann, *Electron. Lett.* **21**, 737 (1985).
3. R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, *Electron. Lett.* **23**, 1026 (1987).
4. L. F. Mollerauer and R. H. Stolen, *Opt. Lett.* **9**, 13 (1984).
5. M. Nakazawa, E. Yoshida, and Y. Kimura, *Electron. Lett.* **29**, 63 (1993).
6. E. Yoshida, Y. Kimura, and M. Nakazawa, *Electron. Lett.* **31**, 377 (1995).
7. D. J. Richardson, A. B. Grudinin, D. N. Payne, *Electron. Lett.* **28**, 778 (1992).
8. M. E. Fermann, F. Haberl, M. Hofer, and H. Hochreiter, *Opt. Lett.* **15**, 752 (1990).
9. I. N. Duling III, *Electron. Lett.* **27**, 544 (1991).
10. D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne, M. W. Phillips, and V. J. Matsas, *Electron. Lett.* **27**, 731 (1991).
11. 박희갑, 임경아, 한국광학회지 6권 2호, 142 (1995).
12. M. Hofer, M. E. Fermann, F. Haberl, M. H. Ober, and A. J. Schmidt, *Opt. Lett.* **16**, 502 (1991).
13. K. Tamura, H. A. Haus, and E. P. Ippen, *Electron. Lett.* **28**, 2226 (1992).
14. F. V. Kowalski, S. J. Shatti, and P. D. Hale, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 734 (1988).
15. H. Sabert and E. Brinkmeyer, *Electron. Lett.* **29**, 2122 (1993).

16. G. Town, J. Chow, and M. Romagnoli, *Electron. Lett.* **31**, 1452 (1995).
17. D. Burns and W. Sibbert, *Electron. Lett.* **26**, 505 (1990).
18. C. R. Cochlain, R. J. Mears, and G. Sherlock, *Photonics Technol. Lett.* **5**, 25 (1993) 1919. G. T. Harvey and L. F. Mollenauer, *Opt. Lett.* **18**, 107 (1993).
20. S. V. Chernikov, E. M. Dianov, D. J. Richardson, and D. N. Payne, *Opt. Lett.* **18**, 476 (1993).
21. E. Yoshida, Y. Kimura, and M. Nakazawa, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 932 (1992).
22. M. L. Dennis and I. N. Duling III, *Electron. Lett.* **28**, 1894 (1992).
23. M. Nakazawa, E. Yoshida, and Y. Kimura, *Electron. Lett.* **30**, 1603 (1994).
24. M. Margalit, M. Orenstein, G. Eisenstein, *Opt. Lett.* **20**, 1791 (1995).
25. Z. Ahmed and N. Onodera, *Electron. Lett.* **32**, 455 (1996).
26. M. E. Fermann, L. M. Yang, M. L. Stock, and M. J. Andrejco, *Opt. Lett.* **19**, 43 (1994).
27. H. Lin, D. K. Donald, R. M. Fortenberry, W. H. Perez, F. G. Kellert, and S. A. Newton, Proc. of OFC '97 paper WL5 (1997).