

고리형 어븀첨가 광섬유 레이저의 수동형 모드로킹에 관한 연구

한 두 희*

A Study on the Passive Modelocking of Ring Type Er-doped Fiber Laser

Doo Hee Han*

요약 어븀 첨가된 고리형 광섬유 레이저를 제작하여 외부 조절기를 적용하지 않은 수동형 모드로킹을 구현하였다. 모드로킹 현상은 단일 모드로킹 과정과 이중 모드로킹 과정이 관측되었고 분산천이 광섬유의 길이를 변화시켜 65 fs의 시간폭을 갖는 초단 펄스를 얻었다. 한편 고차조화모드로킹과 Q스위치된 고차조화 모드로킹도 구현하였는데, 연속과 고차조화 모드로킹은 17차까지 구현하였으며, 펄프 전력의 감소가 연속과 고차 조화 모드로킹에서 Q스위치된 고차조화 모드로킹으로 변화시키며, 이러한 과정이 편광조절기에 의해서도 이루어 졌다. 이러한 일련의 초단 펄스열의 연구는 광통신용 신호원으로 개발에 중요한 역할을 한다.

Abstract A passively mode-locked ring type fiber laser had been installed in order to get the short pulses. The single and the double mode-locking were appeared, and the shortest pulse length of 65 fs was obtained with a 110 m long dispersion shifted fiber(DSF) in a local cavity of 139.8 m. Also high order harmonic modelocking of 17th and Q-switched high order harmonic modelocking were obtained.

Key Words : Optical fiber laser, Modelocking.

1. 서 론

완전광통신을 구현하기 위한 접근으로서 근래에 들어와 통신용량을 극대화하기 위해서 빛의 시간적 특성과 파장특성, 그리고 공간적 특성을 최대로 이용하여 대용량 광통신 기술을 확보하려는 노력이 이루어지고 있다. 빛의 시간적 특성 이용을 극대화 하기 위한 노력으로 고속 광시간분할 역다중 소자로 응용이 가능한 비선형 광학 효과를 이용한 광소자 스위치에 대한 연구가 이루어져 왔으며, 약 10 Gbps급 수준의 광섬유 역다중 소자의 구현은 실현되었다. 현재 세계적으로 수십 내지는 수백기가급의 광신호를 처리하는 소자를 시험하는 단계에 이미 이르렀으며, 이러한 세계적인 수준을 극복하여 그 이상의 수준을 확보하고 아울러 이러한 광섬유 스위치를 고속 광전송에 활용하기 위해서는 고속 동작시 가장 문제가 되는 색분산효과를 극복하여야 한다. 광전송 기술의 고속 및 대용량화하는 과정에서 광출력에 따라 유

도될 수 있는 비선형 광학 효과의 분석과 이에 의한 한계적 특성의 이론적인 연구는 이루어 졌다. 또한 고속 광시간분할 다중 전송에 응용이 가능한 고속 광섬유 스위치 구도에 있어서의 색분산 보상 구도와 이의 응용 아울러 대용량 광통신에 필요한 변환제한된 초단펄스 생성용 광섬유 레이저 구도와 다과장 채널 증폭용 광섬유 증폭기, 분산보상용 비선형 광학세로에 대한 연구도 필요하다.

이 논문에서는 변환제한된 초단 펄스 생성용 광섬유 레이저의 구도에 대한 연구의 일환으로 안정적인 초단 펄스를 얻을 수 있는 고리형 광섬유 레이저에서 모드로킹을 구현하였으며, 분산천이 광섬유 (DSF)의 길이를 변화시켜 증 색분산과 펄스폭의 관계를 알아보았고 이를 통하여 초단 펄스를 얻었다. 또한 이러한 구도를 통하여 외부 조절기를 달지 않은 상태에서 고차 조화 연속과 솔리톤 모드로킹 및 Q 스위치된 고차 모드로킹을 구현한 바와, Q 스위치된 펄스 피크의 간격이 펄프 출력과 편광 조절기(polarization controller :PC) 조절에 의하여 변화되는 것을 소개 한다.

*정운대학교 건축공학과

본 논문은 1999년 정운대학교 학술연구조성비의 일부지원 및 2000년 진광학과의 공동기술개발 협약에 따라 광통신 사업을 위한 사전 연구의 일환으로 이루어졌으며, 그 핵심내용은 초단펄스 생성을 고리형 어븀첨가 광섬유 레이저를 이용하여 실현한 것과 이에 수반되는 현상을 피력하였다. 이는 광통신에 필요한 초단펄스에 대한 기반기술이다. (Tel : 041-630-3273)

2. 이 론

수동형 모드로킹된 광섬유 레이저는 전광변조기(electro-optic modulator)와 같은 외부 제어기를 사용하지 않고 포화 흡수체, 비선형 광섬유 루프 거울, 비선형 편광회전등을 이용하여 극초단 광펄스를 만드는 레이저 구조이다. 비선형 편광회전이 포화흡수체로 사용될 수 있음은 Stolen에 의해 처음 발표되었으며[1], 이 특성을 이용한 고리형 광섬유 레이저로 모드로킹된 레이저 펄스를 얻을 때 공진기의 길이가 짧기 때문에 8자형 등의 구조를 가진 레이저 보다 상대적으로 레이저의 반복률을 높이는 데 용이하다고 여겨져 왔다[2,3].

고리형 모드로킹된 광섬유 레이저의 작동 원리를 살펴 보면, 편광기를 통과하는 선형 편광된 광선은 첫번째 편광조절기에 의해 타원편광으로 된다. 이것은 서로 다른 강도를 가진 수직인 두 선형 편광 성분의 중첩이며 광섬유를 진행하는 동안 매질 자체의 비선형 복굴절 특성에 의한 위상 차이를 겪게 된다. 이 위상 차이가 π 만큼 될 때 마다 편광 비트가 생기고 이는 곧 편광 스위칭으로 응용할 수 있다. 이러한 스위칭 현상을 이용해 고리형 광섬유 레이저의 수동형 모드로킹을 얻을 수 있으며, 이 경우 출력되는 수동형 모드로킹된 레이저의 펄스 폭은 레이저 공진기 내의 총 색분산 값에 영향을 받게 된다. 즉 안정된 솔리톤 파장에 있어서 펄스폭과 총 분산값의 관계는 다음과 같다[4].

$$\tau = \frac{1.552\lambda^3}{3\pi^2 c\lambda} \frac{D|L}{c} \cdot \cos(2\theta) \quad (1)$$

이때 τ 는 시간 펄스폭, D는 총 색분산, L은 광섬유의 길이, c는 광속도, λ 는 피코파장, θ 는 광섬유의 편광축과 입사광의 편광축과의 사이각이다. 총 분산값이 최소일 때 펄스폭이 최소가 된다.

어플 첨가된 광섬유 레이저는 980 nm 또는 1480 nm의 펌프원으로 여기시켜 ${}^4I_{13/2}$ 에서 ${}^4I_{15/2}$ 로 천이 될 때의 1530 nm 를 정점으로 하는 폭넓은 대역의 발진을 하게 된다. 모드로킹이 일어날 때의 스펙트럼 피크는 1530 및 1560 nm 부근이 주를 이룬다.

능동형 모드로킹에 비하여 수동형 모드로킹의 경우는 상대적으로 발진 레이저 펄스의 반복률은 작지만, 광섬유에서 일어나는 비선형 광학 특성과 분산 특성에 의해 고리형 광섬유 레이저 내의 순환하는 레이저 빔의 변조 불안정성이 유도되어 고차 레이저 펄스의 생성이 가능하다[5]. 고리형 광섬유 레이저의 복굴절 요소들 [L], 편광자[P], 회전자[Ω]나 하자. Jones 행렬을 이용하면

공진기 내부를 회전하는 전기장의 요소에 대한 고유 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[P][\Omega][L][E] = \lambda[E] \quad (2)$$

여기서 [E]는 $\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ 를 가리킨다. 이때 f와 s는 전기장이 복굴절 요소의 빠른 축과 느린 축에 분포함을 나타낸다. (2)식의 고유치 λ_1, λ_2 는 $\lambda_1 = 0$

$$\lambda_2 = \exp(i\beta L) \cos(\theta - \Omega) \cos \theta + \exp(i\beta L) \sin(\theta - \Omega) \sin \theta \quad (3)$$

(3)에서 β, β_s 는 길이 L의 복굴절 요소의 축을 진행하는 진행 상수이고, θ 는 빠른 축에 대한 편광기의 방위각이며 Ω 는 회전각이다. 하나의 고유치가 0이므로 이 계는 오직 한 대의 편광 고유치를 갖는다. 두 번째 고유치 크기의 제곱은 제의 회전 강도 전달 T를 나타내준다.

$$T = |\lambda|^2 = \cos^2 \Omega - \frac{1}{2} \sin(2\theta) \sin[2(\theta - \Omega)] \times [1 - \cos(2\pi L/L_0)] \quad (4)$$

이때 L_0 는 복굴절 요소의 자연 선형 비트 길이이다[6]. 만약 고리가 동작되는 파장의 정수배이면 T는 $\cos^2 \Omega$ 가 되어 편광자의 위치에 무관하고, 파장의 반정수배이면 T는 $\cos^2(2\theta)$ 가 되며, θ 가 0이면 T는 파장에 무관하다. 고리형 광섬유 레이저의 수동형 고차 조화 모드로킹은 능동형 모드로킹 때와 같이 조절기를 달지 않고 일어나기 때문에 편광 조절기의 조절로 야기되는 복굴절의 변화에 의하여 위의 선형 강도 전달 T에 적당한 조건을 부여하여 고차조화 모드로킹이 일어난다고 여겨진다. 따라서 고차 조화 모드로킹의 차수는 다분히 우연적이고, 특정 모드로 정확히 조절하기가 용이하지 않다.

포화흡수체에 의한 레이저의 작동 모드에는 연속파, 연속 Q 스위칭, Q 스위칭된 모드로킹, 연속파 모드로킹 등으로 나뉘며, 모드로킹된 펄스가 Q 스위칭된 테두리 안에 위치한 것을 Q 스위칭된 모드로킹이라고 한다 [6-9].

3. 실험

3.1. 실험장치

Figure 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 기본적으로 광섬유의 길이는 변경을 시켰지만 광소자들의 위치는 변경시키지 않았다. 펌프광원으로 1480 nm 파장의 레이저 다이오드가 사용되었고, 1480/1550 커플

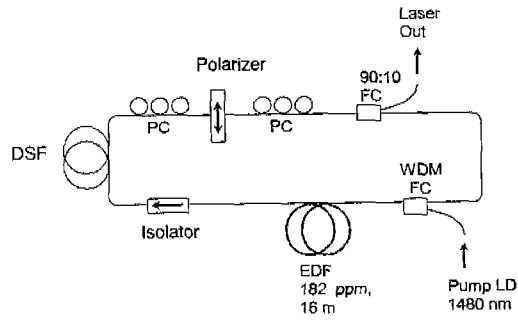


Figure 1. 실험장치.

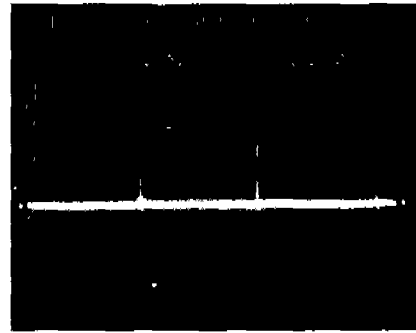
여, 이분 침가된 광섬유, 고립기, 분산 천이 광섬유 (DSF), 편광기, 90/10 광 커플러 등으로 고리형 공진기가 구성되었다. 이분 침가된 광섬유는 이분 침가율이 182 ppm 이고, 색분산이 1558.5 nm 에서 50.1 ps/nm-km 이었으며, 분산 천이 광섬유는 1560 nm 에서 색분산이 0.881 ps/nm-km이고, 영분산 파장이 1546.2 nm였다.[10] 두개의 PC는 분산 천이 광섬유를 감아 제작하였으며, 이들 전체의 길이는 약 6 m였다. 편광기는 삽입 손실이 0.6 dB이고, 후진 반사율이 65 dB인 특성을 갖는 편광기가 사용되었다. 레이저에서 출력된 신호는 광학 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)와 광상관기(auto-correlator)를 사용하여 측정·분석하였다.

3.2. 모드로킹

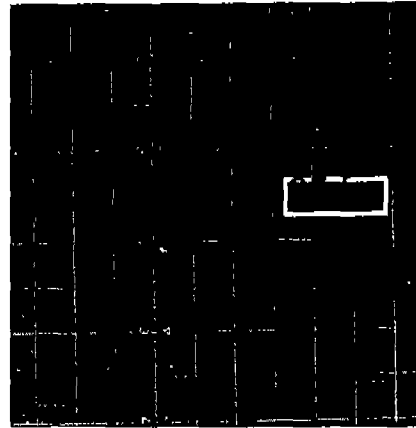
본 실험에서 단일 모드로킹은 대부분 1560 nm 부근에서 피크가 형성될 때 일어났으며, 편광조절기의 위치 조절에 따라 스펙트럼의 폭이 변화하였다. DSF의 길이를 변화시키면서 광상관기로 펄스의 폭을 조사한 결과 20 m 이하 DSF에서는 레이저 출력이 불안정하여 모드로킹 상태를 오래 유지하지 못하였고, 200 m 이상에서는 레이저 출력이 약하여 측정이 어려웠다. 약 110 m의 DSF가 사용될 때 스펙트럼폭은 42.3 nm였고, 펄스의 모양을 sech로 가정했을 때[11] 펄스의 시간폭은 약 65 fs이었다.

이때 시간 빛 번드폭의 곱은 약 0.34였다. 펄스의 반복률은 1.47 MHz였고, 이에 대응하는 공진기의 길이는 139.8 m였다. 40.5 mW의 펄스파워에 대해 측정된 모드로킹된 레이저 출력의 평균 파워와 피크파워는 각각 0.39 mW 및 185 W였다. Figure 4는 분산천이광섬유 길이에 대한 시간폭 및 스펙트럼폭의 관계를 보여 준다.

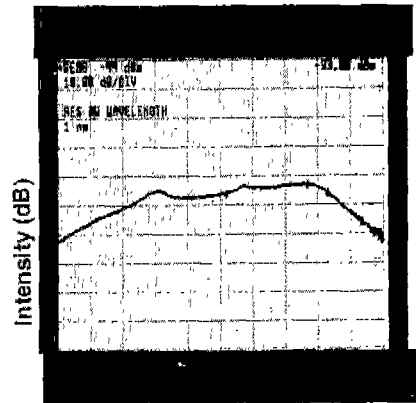
한편 편광조절기로 스펙트럼 폭을 넓게 조절하는 과정에서 스펙트럼이 1530 nm 부근과 1560~1580 nm 부근의 두곳에 정점을 갖는 이중 모드로킹 현상이 나타났다. 펄스가 이중으로 나오는 것은 30 km의 단일모드 광섬유



(1) 오일로스코프 화면



(2) 광상관기 기록



(3) OSA 기록

Figure 2. 65 fs 초단펄스.

를 연결하여 펄스가 두 개의 피크로 갈라지는 것을 확인하였고, 스펙트럼에서 정점간의 간격에 해당하는 시간차를 나타냈다. 한편 이러한 이중 모드로킹이 일어날 때는 펄스의 기저가 위로 봉긋하게 올라가는 현상이 일어난데, 이는 비선형 압축에 의한 결과이다. Figure 5는 이중 모드로킹이 일어날 때의 스펙트럼이다. 왼쪽에서 첫 번째 피크는 1480 nm의 펄스파워에 의한 것이고, 두

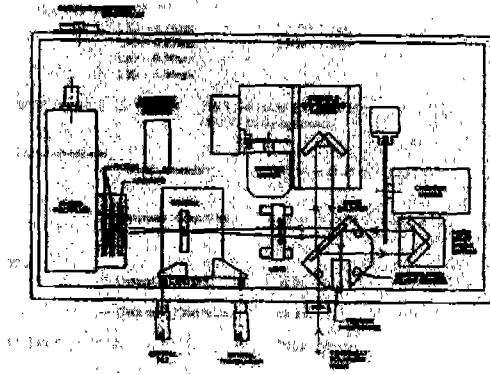


Figure 3. 광상관의 개략도.

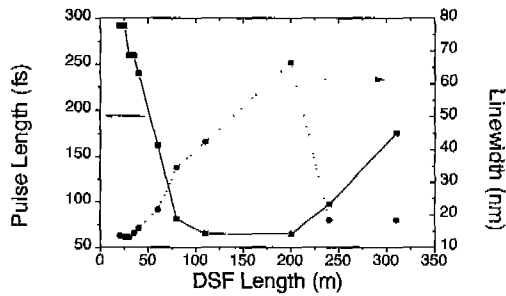


Figure 4. 분산천이광섬유 길이에 대한 시간폭 및 스펙트럼폭.

번째 피크는 1530 nm의 것이고 세 번째 피크는 1560 nm 부근이다. 스펙트럼 반치폭은 1530 nm 부근이 13 nm이고 1560 nm 부근이 25 nm 정도이다.

3.3. 고차 조화 모드로킹

(high order harmonic mode-locking)

기본 공진기 주파수로 박진하는 수동형 모드로킹을 먼저 유도하고 스펙트럼 파장 부근에서 PC를 조절하여 고차 조화 모드로킹 현상을 2차로 유도한다. 이러한 현상의 완전한 이론적 규명은 알리지 않았지만 광섬유에서 일어나는 비선형 광학 특성과 분산 특성에 의해 고리형 광섬유 레이저 내부를 순환하는 레이저 빛의 변조 불안정성도 한 원인으로 알려졌다[12]. 스펙트럼만으로는 조화 모드로킹의 차수를 알기 어렵고, RF analyzer와 오실로스코프에 나타나는 펄스열로 확인할 수 있었다. 조화파의 차수에 따른 펄스폭의 변화는 거의 없었고, 펄스 전력을 변화시킬 때 조화파의 차수가 불연속적으로 변하였는데, 규칙성이 부족하였다.

본 고리형 구조에서 21 m의 어부 광섬유와 200 m의 분산 천이 광섬유를 달았을 때 최고 17차 조화 모드로킹된 펄스가 얻어졌으며, 이때 반복률은 14 MHz, 펄스폭

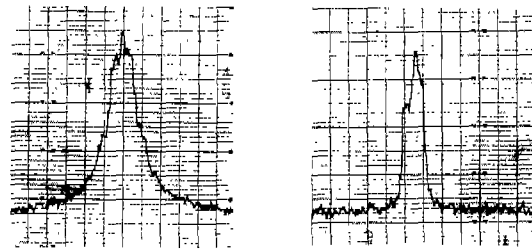
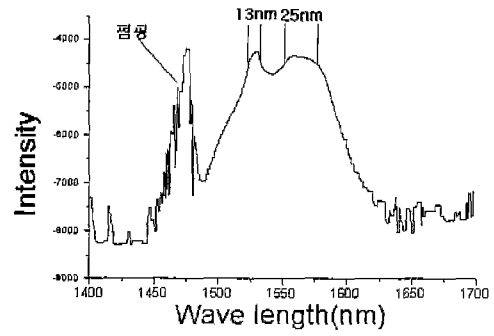


Figure 5. 이중 모드로킹이 일어날 때의 스펙트럼.

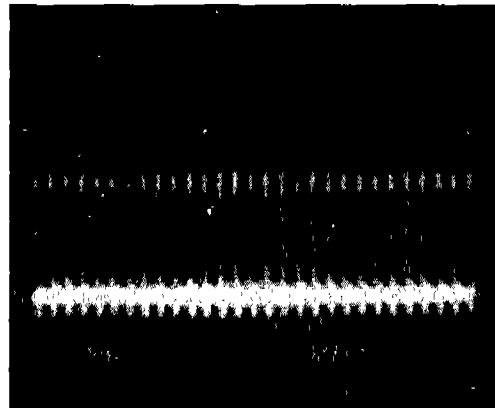


Figure 6. 17차 조화 모드로킹의 오실로스코프 기록.

은 0.78 ps, 스펙트럼 반치폭은 1.1 nm, 레이저 평균 출력은 0.44 mW였다. 펄스폭이 변환제한된 펄스폭 보다 작은 값을 갖는데 이는 비선형 압축에 의하여 펄스가 심하게 잘려있기 때문이다. Figure 6은 17차 조화 모드로킹의 펄스 모양이다. Figure 7은 17차 조화 모드로킹 펄스의 펄스열과 스펙트럼의 모양이다.

한편 이러한 연속파 고차 모드로킹에서 PC를 적당히 조절하거나 펄스 출력을 변화시키면 Q 스위치된 모드로킹 현상이 일어났다. Figure 8은 펄스 출력을 변화시켰을 때 7차 Q 스위치된 펄스의 피크간의 간격이 변화하는 것을 보여준다. 펄스 출력을 크게 할 경우 펄스의 피크 간격이 좁아졌다. 유사한 현상이 펄스 출력을 고정하

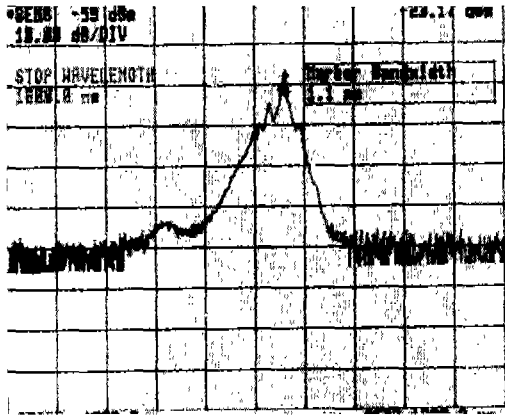


Figure 7. 17차 조화 모드로킹 스펙트럼.

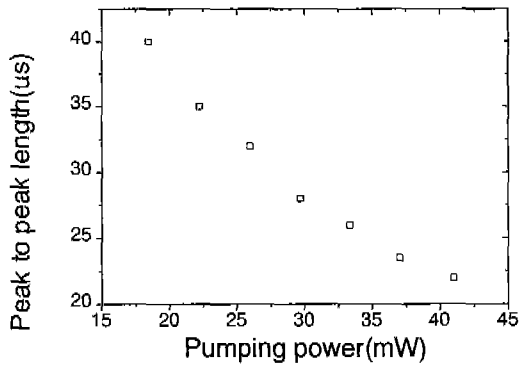


Figure 8. 펌프전력 대 피크간격.

고 PC를 조절할 경우에도 일어났다. 이것은 이완 진동 (relaxation oscillation) 에 기인한 Q 스위칭의 한 특성이다.

Figure 9는 EDF 16 m, DSF 110 m를 연결했을 때 펌프 출력을 낮추므로 인하여 5차 연속파 조화 모드로킹이 5차 Q 스위치된 모드로킹으로 변하는 모습을 보여주고 있다. (a)는 40.53 mW 펌프에서의 CW 레이저, (b)는

27.28 mW 펌프에서의 Q 스위치된 모드로킹, (c)는 20.92 mW 펌프에서의 Q 스위치된 모드로킹 펄스의 모양을 나타낸다. 40.53 mW로 펌핑했을 때 나타난 연속파 5차 모드로킹은 27.28 mW로 펌핑할 때부터 Q 스위치된 5차 모드로킹으로 진화되었으며, 폭이 깊어지면서 피크간격이 증가하다가 20.92 mW로 펌핑할 때 Q 스위치된 3차 모드로킹이 되었다. Q 스위치된 고차 조화 모드로킹 펄스는 광통신용 펄스원으로는 적당치 않다. 따라서 충분한 펌프 출력을 공급하고 PC를 조절하여 연속파의 고차조화 모드로킹을 유도하는 것이 바람직하다.

4. 결론 및 고찰

고리형 어블셋가 광섬유 레이저의 모드로킹 펄스의 총 색분산값과의 관계를 DSF의 길이를 변화시키면서 조사한 결과 DSF 110 m에서 65 fs의 초단 펄스를 얻었다. 이는 외부 장치를 달지 않고 얻은 펄스폭 중에는 가장 짧은 값이다[13-16]. 수동형 모드로킹 때 수반되는 기저의 용기현상은 차후 개선되어야 할 사항이다. 단일 모드로킹 상태에서 PC를 조절하여 이중 모드로킹 현상을 발견하였다. 1530 nm 부근의 정점은 스펙트럼폭의 변화가 거의 없었고 또한 정점의 위치도 거의 일정하였다. 한편 1560~1580 nm 부근의 정점은 스펙트럼폭에 따라 위치가 달라졌다. 이는 장파장(1560~1580 nm) 쪽의 피크와 단파장(1530 nm)쪽의 피크가 서로 다른 성질의 레이저일 가능성을 보여 준다.

또한 고리형 광섬유 레이저에서 편광을 조절하여 고차 조화 모드로킹을 성공적으로 수행하였고, 이득 매질의 편광양을 조절하여 연속파 고차 조화 모드로킹 및 Q 스위치된 고차 모드로킹을 유도하고 그 특성을 알아보았다. 연속파 고차 조화 모드로킹의 펄프 출력을 낮추면 차수가 불연속적으로 떨어졌으며, 출력을 올릴 경우 불

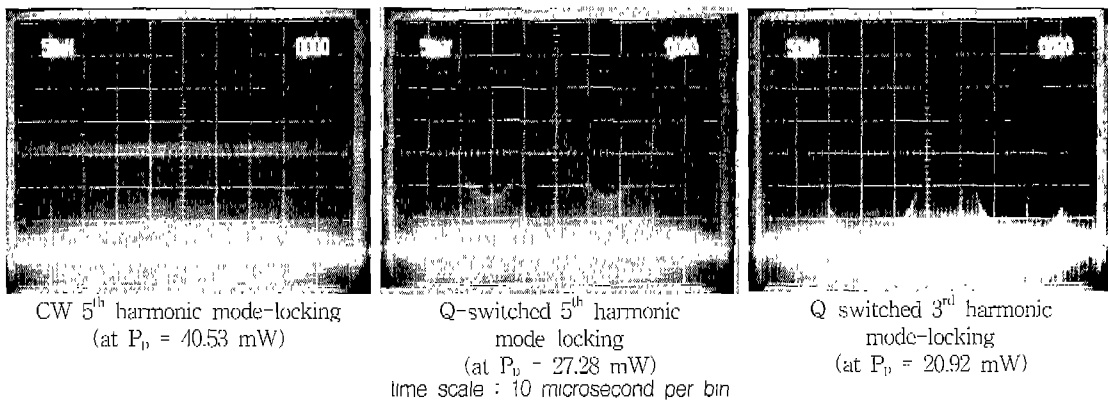


Figure 9. 펌프출력 변화에 의한 CW 레이저의 변화.

인속적으로 증가하였다. 감소할 때와 증가할 때 같은 경로를 택하지 않았고 불규칙하게 변화하였다.

Q 스위치된 고차 조화 모드로킹의 경우 펄스 출력을 변화시키면 피크간의 간격이 변화하였다. 이러한 현상은 PC를 조절하여 복굴절 변화를 주어도 일어났다. 또한 연속과 고차 조화 모드로킹의 경우 펄스출력을 낮추면 Q 스위치된 고차 조화 모드로킹이 일어났다.

고리형 광섬유 레이저에서 만들어지는 모드로킹 펄스는 펄스폭이 대단히 좁고 안정되어 있다. 따라서 여기에 OTDM(optical time division multiplexing)등의 장치를 추가하여 펄스의 빈도를 높인다면 좋은 광통신 방원으로 쓰일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] R. H. Stolen, J. Botincau and A. Ashikin, "Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fiber", *Opt. Lett.* Vol. 7., pp. 512-514, 1982.

[2] V. J. Matsas, D. J. Richardson, T. P. Newson, and D. N. Payne, "Characterization of self-starting, passively mode locked fiber ring laser that exploits nonlinear polarization evolution", *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 5, pp. 358-360, 1993.

[3] M. Nakazawa, E. Yoshida, T. Sugawa, and K. Kimura, "Continuum suppressed, uniformly repetitive 136 fs pulse generation from an Erbium doped fiber laser with nonlinear polarization rotation", *Elect. Lett.*, Vol.29, No. 15, pp. 1327-1329, 1993.

[4] 한두희외, "수동형 모드로킹된 고리형 광섬유 레이저의 분산 및 복굴절률에 따른 출력 특성", *Proceedings of SULA'97*, pp. 13-21, 1997.

[5] P. Franco, F. Fontana, I. Cristinani, M. Midrio, and M. Romagnoli, "Self-induced modulational-instability laser", *Opt. Lett.*, Vol. 7, pp. 2009-2011, 1995.

[6] V. J. Matsas et al., *Optics communications* Vol. 92, pp. 61-66, 1992.

[7] F. X. Kaertner, et al., "Control of solid state laser

dynamics by semi conductor devices", *Opt. Eng.*, Vol 34, pp. 2024-2036, 1995.

[8] U. Keller et al., "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid state lasers", *IEEE J. Selected topics in Quantum Electron.* Vol 2, pp. 435-451, 1996.

[9] S. Tsuda et al., "Mode-locking ultrafast solid state lasers with saturable Bragg Reflectors", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* Vol 2, pp. 455-464, 1996.

[10] 한두희외, "수동형 모드로킹된 고리형 광섬유의 분산 전이 광섬유 식이에 따른 출력 특성", *Proceedings of Photonics Conference '96*, pp. 47-78, 1996.

[11] Irl N. Duling, "Compact sources of ultrashort pulses", Cambridge university press, p 38, 1995.

[12] P. Franco et. al, "Modulation instability permitted the conversion of a beat signal through the nonlinear propagation", *Opt. Lett.* Vol. 7, pp. 1009-1011, 1995.

[13] E. Yoshida et al., Femtosecond Erbium-doped fiber laser with nonlinear polarization rotation and its soliton compression, *Jpn. J. App. Phys.*, 33(2), pp. 5779-5783, 1994.

[14] K. Tamura et al., 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode locked all-fiber ring laser, *Opt. Lett.* 18(13), pp. 1080-1082, 1993.

[15] M. Nakazawa, E. Yoshida, T. Sugawa, and Y. Kimura, Continuum suppressed, uniformly repetitive 136 fs pulse generation from an Erbium-doped fiber laser with nonlinear polarization rotation, *Elect. Lett.*, Vol. 29, No. 15, pp. 1327-1329, 1993.

[16] V. J. Matsas, D. J. Richardson, T. P. Newson, and D. N. Payne, Characterization of a self-starting, passively mode locked fiber ring laser that exploits nonlinear polarization evolution, *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 5, pp. 358-360, 1993.