
광섬유 레이저에서의 광궤환에 대한 연구

최 규 남*

Study on Optical Feedback in Optical Fiber Laser

Kyoo Nam Choi*

본 연구는 2006년도 인천전문대학 교내연구비 지원에 의하여 수행되었음

요 약

코히런트 광섬유 센서의 해상도를 향상시키기 위하여 광원의 코히런스 길이를 향상시키는 방법에 대하여 연구하였다. 넓은 파장범위에 걸쳐서 레이저광을 생성할 수 있고 발광 파장대역이 장거리 전송이 가능한 통신용 광섬유의 저 손실 대역인 광섬유 레이저의 코히런스 길이를 향상시키기 위하여 레이저의 광궤환 기법을 이용하였다. 본 논문에서는 광섬유 레이저의 단거리 및 장거리 광궤환 루프가 코히런스 길이에 미치는 영향을 Mach-Zehnder Interferometer를 이용하여 연구하였다. 광궤환 전력량과 광궤환 루프에서의 변조형태가 코히런스에 미치는 영향을 조사하였다. 주파수 천이도는 200m 길이차를 갖는 비대칭 간섭계에서의 위상간섭 정도를 측정하여 계산하였다. 광섬유 레이저에서 단거리 광궤환 루프는 450kHz/sec로 주파수 천이도를 축소시키는데 효과가 있었고 장거리 광궤환 루프는 50kHz/sec로 주파수 천이도를 더 향상시키는 효과가 있음을 알 수 있었다. 실제 코히런트 광센서에 응용 시 고감도 침입자 감지가 기대된다.

ABSTRACT

The method of enhancing visibility in optical fiber sensor was investigated by improving coherence length of light source. The optical feedback technique is used to enhance coherence length in fiber laser which generates laser in near infrared wavelength region and utilizes low loss characteristics of optical communication grade fiber. In this paper, the effect to coherence length by short and long optical feedback paths are investigated by using Mach-Zehnder interferometer technique. The effect to coherence length by changing optical feedback power and optical modulation are investigated. The spectral drift was calculated by measuring the degree of phase perturbation in unbalanced Mach-Zehnder interferometer having 200m path difference. The short optical feedback path was effective to reduce spectral drift to 450kHz/sec and the long optical feedback path in combination with short optical feedback path was found to further reduce spectral drift to 50kHz/sec.

키워드

fiber laser, optical feedback, optical coherence

I. 서 론

광섬유레이저는 넓은 파장범위에 걸쳐서 레이저광을 생성할 수 있고 발광 파장대역이 통신용으로 사용되는 광섬유의 저손실 대역이므로 광섬유 센서 등에 이용하면 경제적으로 고감도 센싱을 할 수 있어 활용분야가 넓다고 할 수 있겠다.

광섬유 레이저가 광원으로 적용될 수 있는 광섬유 침입자 센서는 크게 광 강도 방식, 광 간섭 방식[1-4]의 두 가지로 구별된다. 광 강도 방식은 외부 충격에 의하여 광섬유에 순간적으로 구부림이 발생하면 수신기에 도착하는 광 강도에 변화가 있는 것을 감지하는 방식이다. 이러한 방식은 광섬유의 감지 감도가 광간섭을 이용하는 코히런트 방식에 비하여 상대적으로 약한 단점이 있었다. 광의 코히런트한 특성을 이용하는 공간섭 방식은 광의 경로가 두개로 분할된 후 다시 합쳐질 때 두개의 서로 다른 경로를 따라 전파되어 오는 신호간의 위상차를 감지하는 방식이다. 따라서 마이크론 단위의 외부변화에도 민감하게 작동되어 고감도 특성을 갖게 된다. 특히 마이켈슨 타입의 광섬유센서는 루프 형태의 센서에 적용 가능한 고감도 센서로서 그 응용 분야가 넓다고 할 수 있다.

이러한 광섬유 레이저를 강도감지형 광섬유 센서의 광원으로 이용하는 경우에는 높은 광출력을 낼 수 있으므로 Fabry-Perot 반도체 레이저 광원을 사용하는 경우에 비해 적용거리가 길어지는 이점이 있을 수 있다. 그러나 광의 코히런트한 특성을 이용하는 공간섭 방식 광섬유 센서의 광원으로 사용되는 경우에는 레이저의 코히런스 길이가 길수록 보다 안정되며 고감도 특성을 얻을 수 있으므로 광원의 코히런스 길이를 길게 하는 것이 필요하다.

광섬유 레이저는 일반적으로 발광되는 선폭이 넓은 특성을 갖고 있다. 따라서 이러한 광섬유 레이저의 발광되는 파장선폭을 줄이기 위해서는 여러 가지 기법들이 요구되어진다. 보편적으로는 FBG(Fiber Bragg Grating)가 많이 사용되나 통상 0.5nm 이하의 선폭을 생성하기에는 FBG의 특성상 어려움이 따르게 된다. 본 연구에서는 이러한 광섬유 레이저의 발광 선폭을 축소시키기 위하여 광패환 기법을 사용한 실험적인 접근 방법을 사용하여 여러 가지 자극에 대한 반응을 연구 하였다.

논문의 구성은 2장에서는 광의 코히런스에 대하여 논

하고 3장에서는 실험방법에 대하여 논하였고 4장에서는 실험결과, 마지막으로 5장에서 결론으로 끝맺었다.

II. 광의 코히런스

공간섭 방식 광센서에 사용되는 레이저광원의 특성을 나타내는 변수로서 코히런스 길이가 사용된다. 즉 코히런스 길이가 길수록 광원의 안정도가 높아서 광센서 출력의 SNR이 향상되게 된다. 레이저광의 코히런스(coherence)란 광속이 순수한 사인(sine) 함수로서 표현될 수 있는 시간($2\tau_c$) 및 공간($2c\tau_c$)에서의 범위를 말한다. 여기서 c 는 진공중의 광속, τ_c 는 코히런스 시간을 말한다. 즉 광센서에 사용되는 광원이 얼마나 코히런스를 유지하는가 하는 정도는 식 (1)과 같이 코히런스 함수 $\gamma(t)$ 로서 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= \frac{\left| \int_0^\infty f(t)f^*(t+\tau)dt \right|}{\int_0^\infty f(t)f(t+\tau)dt} \quad (1) \\ &= \frac{|c(\tau)|}{c(0)} \end{aligned}$$

코히런트 광센서에서 두개의 광속이 합쳐지면 간섭 패턴이 생기게 되는데 이상적인 코히런트 광인 경우에는 간섭 프린지(fringe) 패턴이 생기게 되나 실제 경우에는 두개의 광속 상호간의 코히런스 유지 정도에 따라 프린지 가시도 (fringe visibility)가 다르게 된다. 그림 1에서와 같이 두개의 광원 P1과 P2에서 나오는 광속이 시간 τ_0 동안 진행하여 'O'점 도달한 광 강도는 다음 식 (2)에서 I_0 , Q점에서의 광 강도는 I_Q 와 같이 나타낼 수 있다. 아래 식에서 시간 $t'' = t' + \tau_0$ 이며 τ_0 는 광속이 지점 P1, P2에서 O점까지 진행한 시간이다.

따라서 광센서의 수신점에 해당되는 두개의 광원이 합쳐지는 지점의 프린지 가시도(fringe visibility) $V(\tau)$ 는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 두개의 광속의 크기가 같으면 프린지 가시도와 코히런스 함수의 관계는 $\gamma(t) = V(\tau)$ 이 된다.

$$\begin{aligned}
 I_0 &= AA^* \\
 &= \langle \{f_1(t'') + f_2(t'')\} \{f_1^*(t'') + f_2^*(t'')\} \rangle \\
 I_Q &= \{f_1(t) + f_2(t+\tau)\} \{f_1^*(t) + f_2^*(t+\tau)\} \\
 &= I_1 + I_2 + 2|c_{12}(\tau)| \cos(\omega\tau)
 \end{aligned} \tag{2}$$

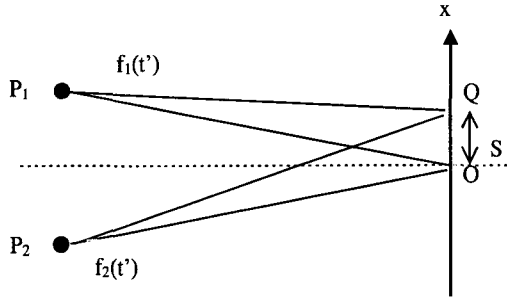


그림 1. 두개의 광원의 간섭
Fig. 1. Interference between two light sources

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \\
 V(\tau) &= \frac{2|c_{12}(\tau)|}{|c_{12}(0)|}
 \end{aligned} \tag{3}$$

코히런트 광센서는 이러한 프린지 가시도에 비례한 광 강도의 변화량을 전기신호로 변환하여 센서로 이용하는 방식이다.

코히런트 광원의 파장폭은 극히 작기 때문에 측정시 주파수로 표시되는 FSR로 나타낸다. 이 주파수로 표시되는 FSR 선폭을 다음 식(4)에 대입하면 파장폭으로 환산할 수 있다[5-6].

$$FSR = \frac{1}{\tau_c} = \frac{c_{mat}}{l_c} = \frac{c_{mat}}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \ln 2 \frac{\lambda_c}{|\Delta\lambda_{FWHM}|}} \tag{4}$$

식 (4)에서 τ_c 는 코히런스시간, l_c 는 코히런스거리, c_{mat} 는 매질에서의 광속, λ_c 는 레이저의 중심발진파장, $\Delta\lambda_{FWHM}$ 은 3 dB 파장폭을 각각 나타낸다.

III. 실험

광섬유 레이저의 선폭을 압축시키는 방법으로는 반도체레이저를 펌프 광으로 사용하고 Er^{+3} 광섬유 양 끝단에 FBG(Fiber Bragg Grating)를 두어 Fabry-Perot 공동을 형성하는 방법이 보편적으로 사용된다. 일반적인 Fabry-Perot 공동 레이저에서 파장폭은 다음 식 (5)와 같이[7] 나타내어진다.

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \frac{c^2}{2\pi\lambda^2L} |\ln(R_1R_2)| \tag{5}$$

여기서 R_1 과 R_2 는 공동 거울의 반사도를 나타내며 c 는 공동 내에서의 광속을 나타낸다. 이 식에서 공동의 거리 L 이 클수록 방출되는 레이저광의 파장폭을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이 거리 L 이 필요 이상으로 길어지면 펌프광의 손실이 커져서 효율이 저하하게 되므로 최적치를 유지하여야한다.

광궤환이 발진되는 레이저의 코히런스 길이를 향상시키는지를 측정하기 위하여 그림 2와 같이 단거리 광궤환 루프를 광섬유 레이저에 부가하였다.

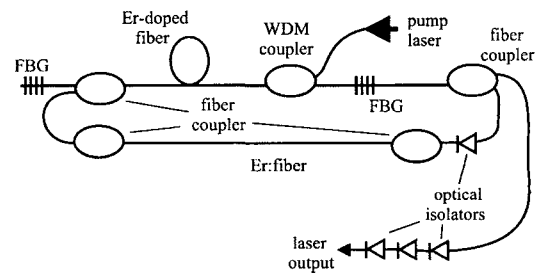


그림 2. 단거리 광궤환 루프 광섬유 레이저
Fig. 2. Fiber laser having short feedback path

장거리 광궤환 루프가 발진되는 레이저의 코히런스 길이에 영향을 미치는 정도를 측정하기 위하여 그림 3과 같이 장거리 광궤환 루프를 광섬유 레이저에 부가하고 광궤환 전력과 그 변조파를 변화시켜가면서 미치는 영향을 조사하였다.

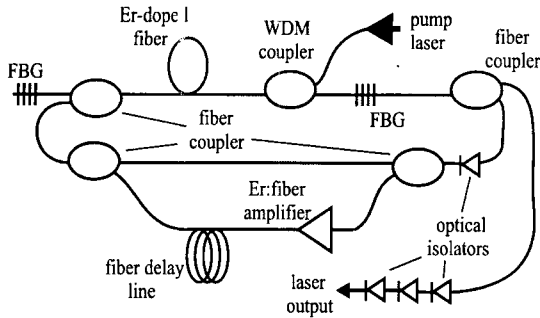


그림 3. 장거리 광케환 루프 광섬유 레이저
Fig. 3. Fiber laser having long feedback path

광섬유 레이저의 주파수 안정도를 측정하기 위하여 그림 4에 보이는 것과 같은 한쪽에 200m의 지연선로를 갖는 Mach-Zehnder 간섭계를 사용하였다. 여기서 200m의 광지연선로는 1 μs의 지연시간에 해당한다. 따라서 이 Mach-Zehnder 간섭계에서 간섭파형의 Fading 주기 1sec는 1MHz/sec의 주파수변위에 해당된다.

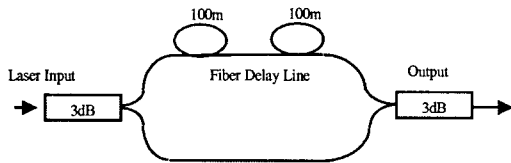


그림 4. 레이저 주파수 천이도 측정장치
Fig. 4. Spectral drift measurement set-up

IV. 실험결과

그림 2와 같은 단거리 광케환 구조를 갖는 광섬유 레이저로부터의 광출력을 그림 4의 측정장치를 사용하여 그림 5와 같이 측정한 결과 간섭파형의 fading 주기가 약 2.2초로 측정되었다. 이는 약 450kHz/sec의 주파수 천이에 해당한다. 그림 5의 오실로스코프 화면에서 X축은 0.5s/div을 나타내고 Y축은 10mV/div을 나타낸다.

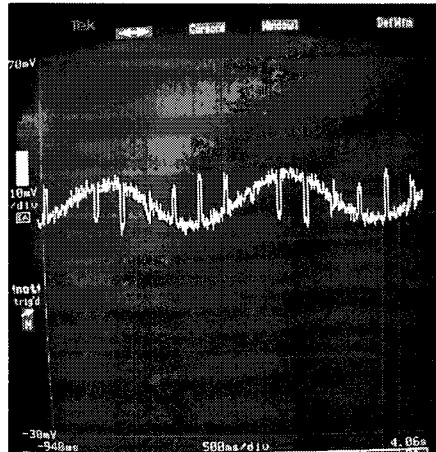


그림 5. 단거리 광케환 루프 광섬유 레이저의 주파수 천이

Fig. 5. Frequency shift of fiber laser having short feedback path

그림 3과 같은 단거리 및 장거리 1.2mW CW 광출력 케환 구조를 갖는 광섬유 레이저로부터의 광출력을 그림 4의 측정장치를 사용하여 그림 6과 같이 측정한 결과 간섭파형의 fading 주기가 약 20초로 측정되었다. 이는 약 50kHz/sec의 주파수 천이에 해당한다. 그림 5의 오실로스코프 화면에서 X축은 0.5s/div을 나타내고 Y축은 10mV/div을 나타낸다.

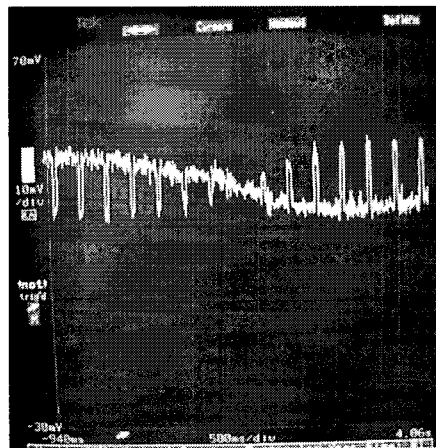


그림 6. 장단거리 광케환 루프 광섬유 레이저의 주파수 천이

Fig. 6. Frequency shift of fiber laser having short and long feedback path

그림 5, 6에서 나타나는 펄스들은 신호의 깊이를 파악하기 위하여 그림 4의 Mach-Zehnder 간섭계의 한쪽 경로를 구형파로 광변조하여 나타낸 것이다.

그림 3과 같은 단거리 및 장거리 광케환 구조를 갖는 광섬유 레이저의 장거리 광케환 루프에 펄스변조를 하여 광케환 파형이 광의 코히런스에 미치는 영향을 그림 4의 측정장치를 사용하여 측정하였다. 케환 되는 광의 변조는 주기가 150 μ sec 이고 펄스폭이 10 μ sec 인 펄스를 사용하였다. 측정된 결과 그림 7과 같이 변조된 광케환 파형과 같은 펄스가 중첩된 파형을 나타내 광케환 파형은 안정된 CW파형을 인가하여야함을 보여주고 있다. 그림 7의 파형을 1kHz의 저역통과필터를 통과 시킨 후의 파형을 그림 8에 나타내고 있다. 간섭파형의 fading 주기가 약 2.2초로 장거리 케환이 없는 경우의 출력파형과 유사한 것으로 측정되었다. 이는 광케환은 평균 광전력이 순간 광전력보다 중요함을 의미한다. 그림 7, 8의 오실로스코프 화면에서 X축은 0.5s/div을 나타내고 Y축은 10mV/div을 나타낸다.

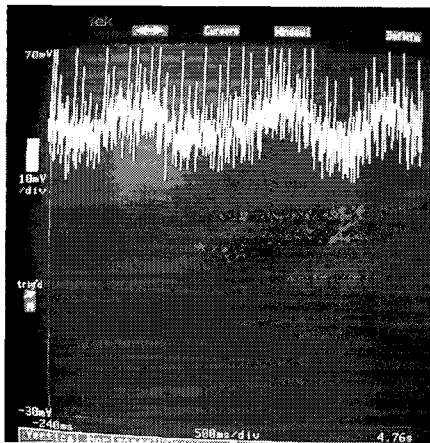


그림 7. 펄스변조 장거리 광케환 루프 광섬유 레이저의 주파수 천이
Fig. 7. Frequency shift of fiber laser having pulse modulated long feedback path

그러나 그림 9에 나타낸 것과 같이 장거리 및 단거리 광케환 루프가 없는 경우는 주파수천이 폭이 너무 커서 그림 4의 측정장치로 측정할 수 없어 광스펙트럼분석기로 측정하였다. 측정된 광파장대역 특성은 모두 3dB 대역폭 기준으로 0.04nm FWHM 으로 이는 FBG의 반사파장 대역폭인 0.4nm FWHM 보다 1/10로 감소되었으므로

광섬유 레이저에 Fabry-Perot 공진기를 도입하는 것만으로도 파장대역폭 압축에 효율적이라고 하겠다.

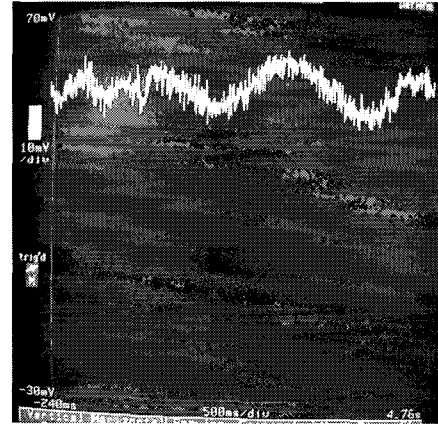


그림 8. 펄스변조 장거리 광케환 루프 광섬유 레이저의 주파수 천이(1kHz LPF 통과 후 파형)
Fig. 8. Frequency shift of fiber laser having pulse modulated long feedback path (after 1kHz LPF)

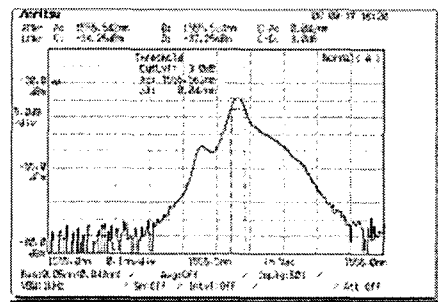


그림 9. 단거리 및 장거리 광케환이 없는 광섬유 레이저의 파장 스펙트럼
Fig. 9. Wavelength spectrum of fiber laser without short and long feedback paths

V. 결론

그림 3과 같은 단거리 및 장거리 광케환 구조를 갖는 광섬유 레이저에서 광케환이 발견되는 레이저광의 코히런스에 미치는 영향을 측정하였다. 단거리 광케환 루프를 광섬유 레이저에 인가하였을 때는 주파수천이도를 450kHz/sec로 축소시키는 효과가 있었고, 1.2mW CW 출력의 장거리 광케환 루프를 광섬유 레이저에 인가하였을 때는 주파수천이도를 50kHz/sec로 더욱 향상시키

는 효과가 있었다. 이렇게 주파수편이도가 줄어들면 코히런트 방식 광센서의 응답특성이 안정되어 고감도 침입자 감지가 용이하게 된다. 광케환 루프에서의 광변조가 광섬유 레이저의 코히런스 정도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 광케환 루프에 펄스변조를 하였다. 이 경우 변조된 광케환 파형이 원래의 특성파형과 중첩된 파형을 나타내 광케환 파형은 안정된 CW파형을 인가하여야함을 알 수 있었다. 즉 광케환은 순간 광전력 보다 평균 광전력이 중요함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 인천전문대학 교내연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

[1] J.P. Dakin and D.A. Pearce, "Novel distributed optical fiber sensing system enabling location of disturbances in a Sagnac loop interferometer" Proc. SPIE 838, San Diego, Paper 18, 1987.

[2] Masaru Kobayashi, Juichi Noda, and Henry F. Taylor, "High spatial-resolution and sensitivity interferometric OTDR," Optical Fiber Sensors Conference, 1992. 8th, pp.65-68, 1992

[3] Shin-ichi Furukawa, Kuniaki Tanaka, Yahei Koyamada, and Masatoyo Sumida, "Enhanced coherent OTDR for long span optical transmission lines containing optical fiber amplifiers," IEEE Photon Tech Lett, Vol.7, No.5, pp.540-542, May 1995.

[4] Hisashi Izumita et al, "Stochastic amplitude fluctuation in coherent OTDR and a new technique for its reduction by stimulating synchronous optical frequency hopping," J. Lightwave Tech, Vol.15, No.2, pp.267-278, Feb. 1997.

[5] E. Wolf, "Coherence properties of optical fields," Rev. Mod. Phys., Vol.37, pp.271, 1965.

[6] R. F. Wuerker, J. Munch, L. O. Heflinger, "Coherence length measured directly from holography," Appl. Opt.

Vol.28, pp.1015-1017, 1989.

[7] 'Celso Cutierrez-Martinez et al., "Automated measurement of optical coherence lengths and optical delays for applications in coherence-modulated optical transmission," IEEE Trans on Inst and Meas, Vol.49, No.1, pp.32-36, Feb. 2000.

저자소개

최 규 남(Kyoo Nam Choi)



1976년 서울대학교 공학사
 1989년 미국 Texas A&M University,
 Electrical Eng. (M.S.)
 1992년 미국 Texas A&M University,
 Electrical Eng. (Ph.D.)

1992년~1994년 LG전자기술원 연구실장
 2000년~2002년 미국 CEMDAS 연구소 연구원
 1994년~현재 인천전문대학 정보통신과 교수
 ※ 관심분야: 광섬유레이저, 광섬유센서, 광응용기기 등