

외부공진형 광주파수가변 레이저를 이용한 실시간 광섬유 케이블의 미세 진동 측정 연구

Real-time Subtle Vibration Sensing of Optical Fiber Cable
based on External-cavity Frequency-swept Laser

장한솔¹, 김창석^{2*}

Hansol Jang¹, Chang-Seok Kim^{2*}

〈Abstract〉

In this paper, we developed a fiber optic interferometer system based on frequency-swept laser. This frequency-swept laser with an external-cavity structure can generate a high coherent light with a linewidth of 132 kHz at 1552 nm. It also shows a superior swept linearity of $R^2 = 0.99995$ under repetition rate of 200 kHz due to absence of mechanical moving parts in the laser cavity. By using a piezoelectric fiber optic stretcher, various vibration experiments were implemented, such as 0.5 to 2.0 kHz vibration signals with intervals of 0.5 kHz, with a sampling rate of 7 kHz. Real-time peak tracking can be successfully recovered according to the applied vibration frequency with high linearity of $R^2 = 0.99983$.

Keywords : fiber optic sensor, frequency-swept laser, vibration sensing

1 주저자, 부산대학교 인지메카트로닉스공학과, 대학원생 1, 2* Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan
E-mail: hsjang888@pusan.ac.kr National University, Busan, Korea

2* 정회원, 교신저자, 부산대학교 인지메카트로닉스공학과,
교수 E-mail: ckim@pusan.ac.kr

1. 서론

최근 다양한 센서 기술들이 산업융합 부문에 각광을 받고 있다 [1-3]. 특히 광섬유 센서는 광섬유 케이블을 측정단으로 이용하여 넓은 영역에 걸친 진동, 온도변화, 변형률 등을 계측하는 기술로, 일반적인 전기센서와 달리 광섬유 센서의 경우 하나의 입출력단을 가지는 광섬유를 이용하여 동시에 많은 다중 지점에 대한 측정이 가능하다는 장점으로 인해 경계 침입 감지, 파이프라인 및 전력 전송 케이블의 상태 관찰, 교량 터널 발전소 같은 대형 건축물의 장기적 안전 모니터링 등에 널리 이용되어 왔다 [4].

광 시간영역 반사계 (optical time domain reflectometry, OTDR)는 펄스 형태의 광을 광섬유 센서단에 입사한 뒤 산란되어 되돌아오는 광을 시간에 따라 측정함으로써 변이가 발생한 지점을 추적하는 기술로, 상대적으로 원리가 간단하고 광원 제작이 용이한 점으로 인해 대체적으로 널리 사용되어왔다 [5]. 또 다른 광섬유 센서 기술로는 광 주파수영역 반사계 (optical frequency domain reflectometry, OFDR)가 쓰이고 있다. OFDR은 OTDR과 달리 광주파수가 연속적으로 가변 출력되는 레이저를 이용하며, 광섬유 측정단으로부터 산란되어 되돌아오는 광과 기준단으로부터 반사되어 돌아오는 광을 상호 간섭시킴으로써 위치 정보를 알아내기 때문에 외부 노이즈에 의한 영향이 상대적으로 적고 높은 공간 분해능을 지닌다 [6].

광섬유 센서를 이용한 실시간 진동 측정을 위해서는 높은 샘플링 속도가 요구되며, 이는 즉, 빠른 반복률을 지닌 광원이 필요함을 의미한다. 단일 광주파수 레이저 기반 반송파 천이 광주파수 가변 레이저는 고속 가변이 가능한 기술 중 하나로, 높은 간섭성을 확보하기 용이한 점으로 인해

실시간 광섬유 진동 측정 센서 기술에 이용된 바 있다 [7]. 하지만 수 GHz의 넓은 영역에서 가변 출력이 가능한 고성능 함수 발생기가 필수적으로 요구되며, 별도의 광주파수 필터링이 요구되는 등 단점이 존재한다.

최근 본 연구진에서는 광섬유 측정단을 레이저 공진기 내부에 배치함으로써 측정단 내부의 반사체의 위치 차이에 따른 레이저 종파 모드 공진 주파수의 차이를 측정하는 능동 모드 잠금 광섬유 센서 기술을 개발하였다 [8]. OFDR 기술에서 광주파수가 가변되는 레이저를 이용하듯, 능동 모드 잠금 기반 광섬유 센서 기술은 공진기 내부에 위치하는 전광 변조기에 인가되는 신호의 주파수를 스캔하기 때문에 높은 샘플링 속도를 구현 가능하다는 장점을 지닌다.

본 연구에서는 수 kHz 수준의 낮은 주파수의 제어신호를 이용하여 구동되는 광주파수 가변 레이저를 전광변조기 기반의 외부공진 구조로 새롭게 설계 및 제작하였다. 공진기의 종파모드 스펙트럼을 직접적으로 제어하여 광주파수 가변을 유도하는 원리상, 반송파 천이 광주파수 가변 레이저에 비해 월등히 낮은 주파수 대역의 출력만으로도 작동 가능하다 [9,10]. 더불어, 기계적 구동장치의 부재로 인해 고속, 고선형성 가변이 가능하며, 이는 즉, 샘플링 속도와 측정 가능한 진동 주파수의 대역이 비례함을 고려할 때 전광변조기 기반의 외부공진 구조 광주파수 가변 레이저가 광섬유 간섭계를 이용한 진동 측정에 적합함을 의미한다. 본 연구에서는 압전 광섬유 인장기 기반 진동 모사 시스템을 구성함으로써 광섬유 간섭계를 이용한 실시간 미세 광섬유 진동 측정을 실시하였다. 더 나아가, 단일 광섬유 케이블 측정단 내부에 복수 개의 반사체를 배치함으로써 맥놀이 주파수 구분을 통해 인가되는 진동 신호의 위치에 따른 독립적 측정 가능성을 확인해보았다.

2. 시스템 구성

2.1 간섭계를 이용한 진동 측정 원리

Fig. 1(a)는 통상적인 마이켈슨 구조의 광섬유 간섭계의 형상을 나타내고 있다. 그림과 같이 기준단 반사부와 측정단 반사부 사이에 광경로차 (Δz)가 존재할 때 발생하는 맥놀이 주파수는 아래와 같이 결정된다 [11].

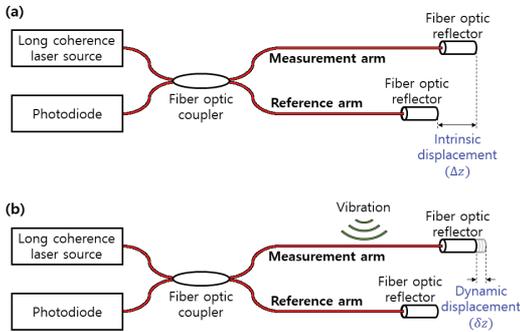


Fig. 1 (a) Optical path length differences of fiber optic interferometer at normal condition and (b) when vibration is applied

$$f_b = \frac{2n\Delta z F_{rep} \Delta F}{c} \quad (1)$$

여기서 c 는 진공상태에서의 빛의 속도, $n\Delta z$ 는 광섬유 굴절률을 포함한 광경로차, F_{rep} 는 광주파수 가변 반복률, ΔF 는 광주파수 가변범위를 의미한다.

Fig. 1(b)는 초기 광경로차가 Δz 인 광섬유 간섭계의 측정단에 진동이 가해짐으로써 추가 미세 광경로차 δz 가 주기를 지나는 함수 형태로 발생하는 경우를 보여주고 있다. 광섬유 상에 단일 주파수의 진동이 가해질 경우 진동으로 인해 광섬유가 시간에 따라 주기적으로 인장/수축하게 되고

이로 인해 시간에 따라 맥놀이주파수가 지속적으로 변화하게 된다. 만약 진동 신호의 주파수를 f_{vib} 라 할 때 시간에 따른 맥놀이 주파수 변화는 아래와 같이 표현 가능하다.

$$f_b(t) = \frac{2n[\Delta z + \delta z \sin(2\pi f_{vib}t)]F_{rep} \Delta F}{c} \quad (2)$$

따라서 위 수식에 의거, 공간섭 신호의 피크 주파수를 추적함으로써 미세한 진동 신호에 대한 실시간 측정이 가능하게 된다.

2.2 외부 공진기 광주파수 가변 레이저

공간섭 현상을 기반으로 하는 광섬유 센서의 특성상 고간섭성의 광주파수 가변 레이저가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 외부 공진기 구조의 광주파수 가변 레이저를 새롭게 설계하였으며, 특히 비 기계적 전광 변조 소자를 이용함으로써 고속화 및 선형화 가변을 구현하였다. Fig. 2는 제작된 외부 공진기 광주파수 가변 레이저의 출력 특성을 나타내고 있다. Fig. 2(a,b)에 나타난 바와 같이 제작된 레이저는 1552 nm 근처에서 발진이 이루어지며 자기 헤테로다인 간섭계를 통해 측정된 선폭은 132 kHz로, 이는 가간섭거리 723 m에 해당한다. 또한, 비 기계적으로 가변이 이루어지기 때문에 Fig. 2(c,d)에 나타난 바와 같이 200 kHz의 고속 가변 조건에서도 동작이 가능함을 확인하였으며, 가변 선형도 역시 $R^2 = 0.99995$ 로 매우 높은 선형성을 지님을 확인하였다. 광주파수 가변 범위의 경우 1 GHz로 측정되었다. 레이저 출력세기의 경우 반도체 광 증폭기에 인가되는 전류값을 조정함으로써 최대 20 mW 이상의 출력을 획득할 수 있었으며, 고반사도의 광섬유 반사체들을 이용하는 본 실험 셋업의

특성상 약 5 mW 미만의 낮은 광출력을 이용함으로써 광검출기의 포화 현상을 방지하였다.

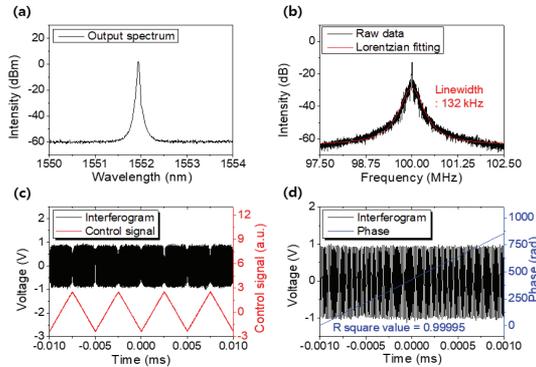


Fig. 2 Output properties of the external-cavity frequency-swept laser. (a) Output spectrum, (b) linewidth, (c) repeatability, (d) linearity

3. 실험 결과

3.1 실험 셋업 구성

Fig. 3은 광섬유 간섭계 기반 진동 측정 실험의 구성도를 나타내고 있다. 그림을 통해 알 수 있듯, 광섬유 간섭계는 마이켈슨 구조를 지니고 있으며, 측정단 총 길이는 약 135 m이다. 다중 반사체에 대한 측정 가능성을 확인하기 위해 부분반사체인 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg grating, FBG) 와 전반사체인 페러데이 회전 거울 (Faraday rotation mirror, FRM)을 이용하였다. 두 개의 반사체 중 FRM에 대해서만 진동이 발생하도록 FBG와 FRM 사이에 압전 광섬유 인장기 (약 15 m 길이)를 배치하였으며, 약 20 m 길이의 지연 광섬유를 추가로 배치함으로써 두 개의 반사체로부터 발생한 간섭 피크가 독립적으로 나타날 수 있도록 하였다. DAQ (data acquisition)의 샘플링

속도 한계로 인해 외부 공진기 광주파수 가변 레이저는 7 kHz의 저속으로 가변을 실시하였으며, 압전 광섬유 인장기에는 0.5 kHz에서 2 kHz까지 0.5 kHz 간격으로 바꾸어가며 전압 신호를 인가함으로써 진동을 모사하였다.

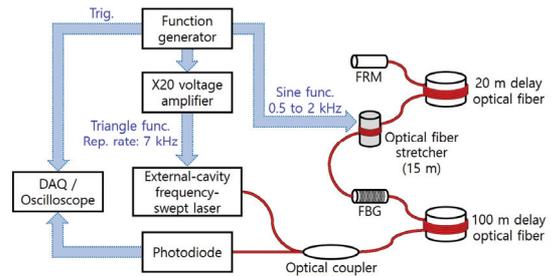


Fig. 3 Schematic diagram of vibration sensing system (FBG: fiber Bragg grating, FRM: Faraday rotation mirror)

3.2 실험 결과

Fig. 4는 압전 광섬유 인장기에 아무런 신호를 인가하지 않았을 때 나타나는 간섭 신호의 고속 푸리에 변환 (fast Fourier transform, FFT) 결과를 보여주고 있다. 그림을 통해 측정단의 100 m 지점에 위치하는 FBG와 135 m 지점에 위치하는

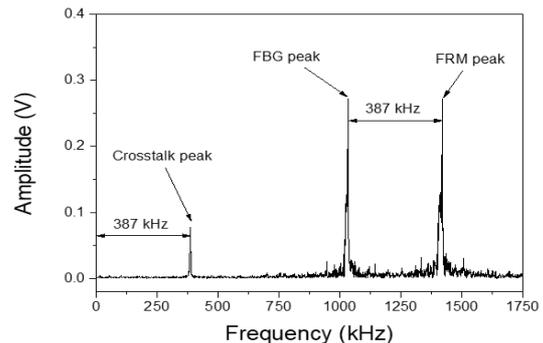


Fig. 4 Measured FFT spectrum of fiber optic interferometer at normal condition

FRM의 반사 피크가 각각 1033 kHz, 1420 kHz로 구분되어 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 고 반사도를 지니는 FBG와 FRM의 특성상 두 반사체로부터 발생하는 누화 피크 역시 387 kHz에서 확인되었다.

Fig. 4에서 압전 광섬유 인장기에 제어신호를 인가할 경우 인가된 신호의 전압에 비례하여 광섬유 길이가 변화하게 된다. 이로 인해 압전 광섬유 인장기 전단에 위치하는 FBG의 경우 광섬유 길이 변화의 영향을 받지 않는 반면, 후단에 위치하는 FRM 반사 피크 주파수의 경우 변화하게 된다. 만약 압전 광섬유 인장기에 AC 신호가 인가될 경우 변조 주파수에 맞추어 FRM 반사 피크 주파수가 변화하게 되고, 이를 추적함으로써 인가된 주파수를 복조할 수 있다. Fig. 5는 압전 광섬유 인장기에 0.5 kHz에서 2.0 kHz까지 주파수를 바꾸

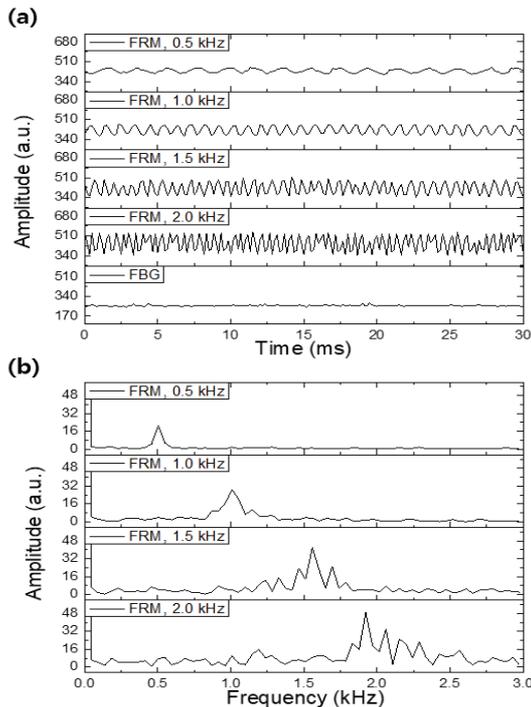


Fig. 5 (a) Time series FRM peak tracking results and (b) FFT results

어가며 인가했을 때 FRM 반사 피크 주파수의 추적 결과를 나타내고 있다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 FRM 반사 피크의 경우 인가된 주파수에 따라 주기적인 신호를 가지고 변화하는 반면, 압전 광섬유 인장기 전단에 위치한 FBG의 경우 변화를 보이지 않는 것을 확인하였다. Fig. 5(b)는 Fig. 4(a)에 대한 FFT 결과를 나타내고 있으며, 인가 주파수가 증가함에 따라 스펙트럼이 고주파 영역으로 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 압전 광섬유 인장기 제어신호의 주파수와 Fig. 5(b)에 나타난 FFT 결과에 대한 가우시안 피팅값의 중심 주파수 사이의 선형성을 나타내고 있으며, 측정된 선형도는 $R^2 = 0.99984$ 로 선형적 관계를 지님을 확인하였다.

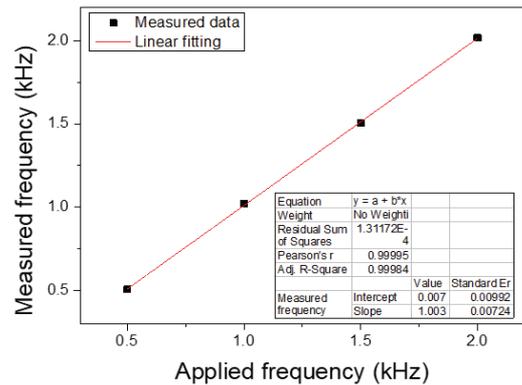


Fig. 6 Linearity of measured frequency according to applied vibration frequency

4. 결론

본 연구에서는 외부 공진기 구조의 광주파수가변 레이저를 이용한 광섬유 간섭계 시스템을 구성하였고 이를 이용하여 미세 진동 신호에 대한 광섬유 간섭계를 이용한 측정 가능성을 확인해보았다. 비 기계적으로 구동하는 광주파수가변 레

이저의 특성상 200 kHz의 고속 가변이 가능함을 확인하였고, 이는 나이퀴스트 (Nyquist) 한계를 고려했을 때 본 기술을 이용하여 100 kHz의 높은 주파수를 지닌 진동에 대한 측정이 실시간으로 가능함을 의미한다. 또한, 광섬유 상에서 서로 다른 거리에 위치하는 두 개의 반사체로부터 획득된 간섭 피크 신호를 주파수 영역에서 구분 가능하였으며, 이는 분산형 진동 측정의 가능성을 시사한다. 광섬유의 단순 인장에 따른 광경로 변화만이 고려된 본 연구와는 달리 실제 환경에서는 진동 신호로 인해 광섬유의 길이뿐만 아니라 굴절률, 편광, 산란도 등에 함께 영향을 미칠 것으로 생각되며, 이로 인한 측정신호에 대한 영향을 충분히 고려해야 한다. 본 기술을 통해 높은 주파수 영역에서 넓은 영역에 걸쳐 진동 측정이 필요한 항공우주, 교량, 터널, 건축물, 보안 등에서 응용 가능할 것으로 판단되며, 더불어, 수 kHz 대의 가청주파수 영역에서의 측정이 가능한 점을 이용하여 분산형 음파 측정, 광섬유 청음기 등의 기술에도 응용 가능할 것으로 보인다.

사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University

참고문헌

[1] 고석조, 박장식, 유기호, 김성원, 이승훈, “진동 현 센서 제작 공정 자동화를 위한 자동 장력 조절 및 접합 장치의 개발,” 한국산업융합학회

- 논문집, vol. 17, no. 2, pp. 63-70, (2014).
- [2] 황원준, “초음파센서 기반 자율주행 로봇의 장애물 회피에 관한 연구,” 한국산업융합학회 논문집, vol. 18, no. 1, pp. 30-36, (2015).
- [3] 이준욱, 신윤지 양혜정, 신보성, “일회용 마스크에 장착을 위한 레이저 기반 그래핀 습도센서 제작에 관한 연구,” 한국산업융합학회 논문집, vol. 23, no. 4, pp. 693-699, (2020).
- [4] Juan C. Juarez, Eric W. Maier, Kyoo Nam Choi, and Henry F. Taylor, “Distributed Fiber-Optic Intrusion Sensor System,” *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 2081-2087, (2005).
- [5] M. K. Barnoski, M. D. Rourke, S. M. Jensen, and R. T. Melville, “Optical time domain reflectometer,” *Appl. Opt.*, vol.16, pp. 2375-2380, (1977).
- [6] W. Eickhoff and R. Ulrich, “Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, no. 9, pp. 693-695, (1981).
- [7] He Li, Qingwen Liu, Yuanpeng Deng, and Zuyuan He, “High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on Φ -OFDR with enhanced crosstalk suppression,” *Opt. Lett.*, vol. 45, no. 2, pp. 563-566, (2020).
- [8] Gyeong Hun Kim, Sang Min Park, Chang Hyun Park, Hansol Jang, Chang-Seok Kim, and Hwi Don Lee, “Real-time quasi-distributed fiber optic sensor based on resonance frequency mapping,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1-9, (2019).
- [9] L. Levin, “Mode-hop-free electro optically tuned diode laser,” *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 4, pp. 237-239, (2002).
- [10] Hai Gong, Zhigang Liu, Yangli Zhou, Weibo Zhang, and Tao Lv, “Mode-hopping suppression of external cavity diode laser by mode matching,” *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 4, pp. 694-701, (2014).
- [11] Xiao-Qun Zhou, Koichi Iiyama, and Ken-ichi Hayashi, “Extended-Range FMCW Reflectometry using an Optical Loop with a Frequency Shifter,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 248-250, (1996).