

## 광섬유를 통한 광 주파수 전송에서 광 위상 잡음의 능동 제거

### Cancellation of phase noise induced by an optical fiber for delivery of optical frequency standard

이원규\*, 김재완, 유한영, 김억봉, 박창용

한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

\*oneqlee@kriss.re.kr

광 주파수 표준은 가까운 장래에  $10^{-17} \sim 10^{-18}$ 의 상대주파수 불확도에 도달할 것으로 예상된다.<sup>(1)</sup> 이렇게 정밀한 주파수를 구현하는 실험 장치들은 여러 개의 광학 테이블을 차지하는 복잡한 시스템으로 이루어져 있다. 따라서, 옆의 광학 테이블이나 다른 실험실에 위치한 장치들에 주파수의 변화가 없이 빛을 보내야 할 경우가 있다. 광섬유를 통한 광전송은 이러한 경우에 편리하게 이용될 수 있지만, 전송 경로상의 온도 변화나 진동으로 인해 전송되는 광 주파수에 잡음이 생긴다. B. de Beauvoir<sup>(2)</sup> 등의 실험 결과에서도 알 수 있듯이 광섬유를 이용한 짧은 거리의 전송에서도 레이저의 선폭이 수 kHz 정도로 넓어지므로, 높은 안정도의 광 주파수를 전송하기 위해서는 환경 영향으로 생기는 광섬유에서의 잡음이 반드시 제거되어야 한다. L. -S. Ma 등은 25 m 길이의 편광유지 단일모드 광섬유를 통하여 532 nm 파장의 광 주파수를 전송하기 위해 두 대의 음향-광 변조기(AOM; acousto-optic modulator)를 사용하여 광섬유에서 생긴 잡음을 제거하는 연구 결과를 발표한 바 있고,<sup>(3)</sup> J. Ye 등은 1064 nm 파장의 요오드-안정화 Nd:YAG 레이저를 3.45 km 길이의 광통신용 단일모드 광섬유를 통해 NIST로 전송하여 원격 절대 주파수 측정을 하는 실험을 하였다.<sup>(4)</sup> 이들은 광섬유에서 생긴 잡음을 제거하기 위해 AOM에 기준 주파수를 공급하는 전압-제어 결정 발진기(VCXO; voltage-controlled crystal oscillator)의 주파수를 조절하여, 광섬유 말단에 원래 레이저와 같은 광 위상을 가지는 빛을 전송할 수 있었다.

본 연구에서는 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통하여 레이저 빛을 전송함에 있어 광섬유에서 생긴 잡음을 제거하는 실험을 수행하였다. 그림 1에 실험 장치를 나타내었다. 광원으로 단일 종모드 광섬유 링 레이저를 사용하였다. AOM (40 MHz)을 통과한 레이저 빛을 광 주파수 전송의 목적으로 쓰이는 광섬유 망으로 통과시켰다. 이 광섬유 망의 말단의 광섬유 연결기는 FC/PC 모양으로 처리되어 반대방향으로 4 % 정도의 반사가 생기게 하였다. 광섬유 망의 잡음이 포함된 광다이오드의 40 MHz 신호와 또 하나의 신호발생기(OSC2)의 40 MHz 기준 주파수 신호를 위상검출기의 두 입력단에 걸어주어서 얻은 위상 잡음 신호를 비례-적분 조절기를 사용하여 OSC1의 외부 주파수 변조 단자에 걸어줌으로써, 광섬유 전송 과정에서 발생한 잡음을 능동적으로 보상하는 실험장치를 구성하였다. 그림 2는 위상검출기의 출력을 나타낸다. 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 작동시키지 않았을 때에는 광경로에서의 진동 때문에 전송된 광 위상에 극심한 변동이 있음을 볼 수 있다. 광섬유 잡음을 제거했을 때, 안정된 광 위상의 표준편차는 0.21 rad이었다. 그림 3은 그림 1(a)의 실험장치로 측정된 전송된 빛의 광 스펙트럼이다. 525 m 길이의 광섬유를 통과하면서 수 kHz 정도의 폭으로 넓어졌던 스펙트럼에서 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 동작시키면 40 dB 이상의 크기로 결맞음 피크가 생겨난다. 그림 4에는 그림 1(b)의 실험장치로 측정된 주파수의 전송 안정도를 알란 편차(Allan deviation)로 나타내었다. 광섬유 잡음을 제거하였

을 때의 광 주파수의 전송 안정도는 1초의 평균시간에서  $2 \times 10^{-17}$ 이었다. 이러한 결과는 이전에 이루어졌던 연구결과들의 전송 성능을 능가하는 것으로서, 차세대 광 주파수 표준의 원격 비교에도 무리가 없을 것으로 생각된다. 또한 이 기술은 한국표준과학연구원에서 차세대 광 주파수 표준으로 개발 중인 광격자 시계의 개발에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

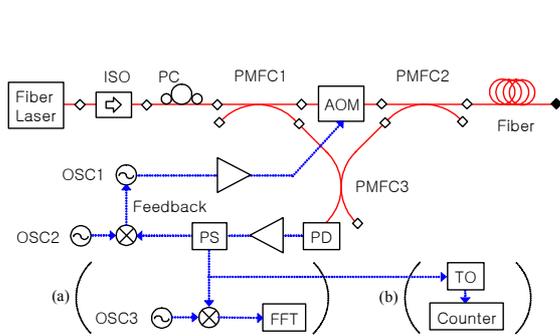


그림 1 . 실험장치도

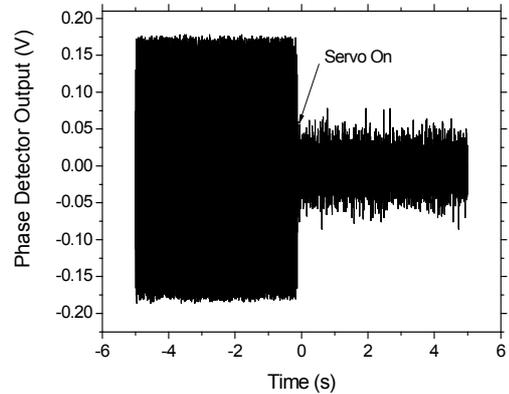


그림 2 . 전송된 빛의 광 위상 잡음 제거

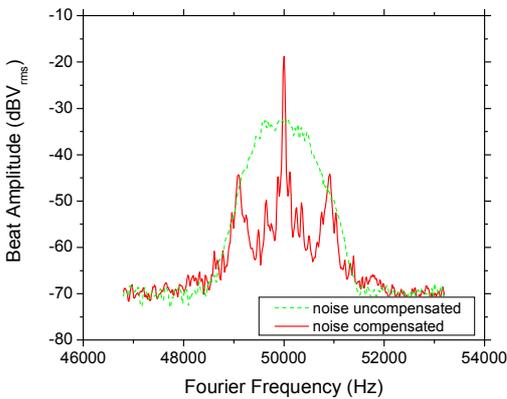


그림 3 . 전송된 빛의 광 스펙트럼

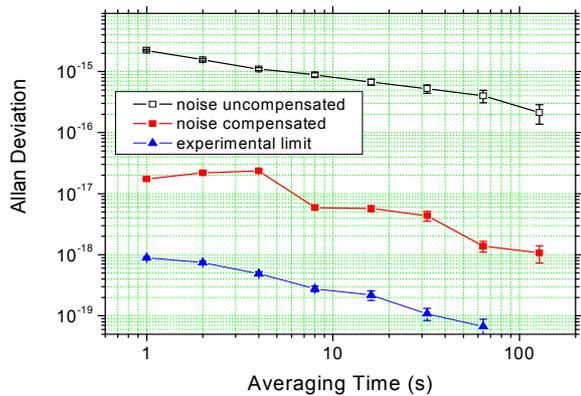


그림 4 . 광섬유를 통해 전송된 빛의 전송 안정도

### 참고문헌

1. L. Holberg, *et. al.*, "Optical frequency standards and measurements", IEEE J. Quantum Electron. **37**, 1502–1513 (2001).
2. B. de Beauvoir, *et. al.*, "Transmission of an optical frequency through a 3 km long optical fiber", Eur. Phys. J. D, **1**, 227–229 (1998).
3. L.-S. Ma, *et. al.*, "Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path", Opt. Lett. **19**, 1777–1779 (1994).
4. J. Ye, *et. al.*, "Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network", J. Opt. Soc. Am. B, **20**, 1459–1467 (2003).